UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LAIANE DO NASCIMENTO SANTOS

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DE JANELAS DE TEMPO AO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT

Juazeiro - BA
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LAIANE DO NASCIMENTO SANTOS

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DE JANELAS DE TEMPO AO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT

Trabalho apresentado à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro – BA, como requisito para obtenção do título de Engenheira de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior

Juazeiro – BA
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO
Para TFC

Laiane do Nascimento Santos

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: ADIÇÃO DA RESTRIÇÃO DE JANELAS DE TEMPO AO ALGORITMO DE CLARKE E WRIGHT

Trabalho de Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Produção, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Paulo César R. de Lima Junior, PhD
Professor Adjunto UNIVASF
SIAPE 1393305

Paulo César Rodrigues de Lima Junior, Dr - UNIVASF

José Luiz Moreira de Carvalho, Dr - UNIVASF

Jorge Alberto Santana de Jesus - FACAPE

Aprovado pelo Colegiado de Engenharia de Produção em 16 / 11 / 2012

	Santos, Laiane do Nascimento
S237r	Roteirização de veículos: adição da restrição de janelas de tempo ao Algoritmo de Clarke e Wright / Laiane do Nascimento Santos. - - Juazeiro, 2012.
	96 f.: il. ; 29 cm.
	Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro-BA, 2012.
	Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior.
	1. Distribuição Física. 2. Transporte. 3. Problemas de Roteirização de Veículos. 4. Janela de Tempo. 5. Clarke e Wright. I. Título. II. Universidade Federal do Vale do São Francisco
	CDD 658.78

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF

Dedico este trabalho à minha família, em particular, à minha avó, ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã, pela confiança e dedicação em mim depositados.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me atendido todas as vezes que rezei e pedi força e coragem para não fraquejar diante das dificuldades encontradas ao longo desses anos, sei que graças a Sua vontade fui capaz de chegar ao fim dessa jornada e é confiando Nele que darei início a mais uma etapa. Que o Senhor faça da minha vida um instrumento de sua obra.

Serei eternamente grata aos meus pais, José Aparecido dos Santos e Selma Maria do Nascimento, por terem construído, mesmo com tantas distâncias e contratempos, uma base familiar forte e unida e, principalmente, por colocarem a frente dos seus sonhos o estudo e a boa educação para suas filhas. Espero no futuro poder desempenhar um papel de mãe espelhado nos exemplos que me deram. Agradeço à Laísa Calliny do Nascimento Santos pelos seus cuidados de irmã mais velha, pelo seu companheirismo e sua fidelidade de toda uma vida.

Com imenso respeito, sou grata a minha avó e segunda mãe, Antônia Maira da Silva, pelas orações e eternas preocupações, nunca irei me esquecer de sua pergunta feita quanto à escolha do meu curso. Agradeço ao meu Padrinho Paulo César e à minha Tia e Madrinha Célia Regina pelo apoio dado, principalmente, durante os anos que morei com eles. Agradeço às minhas Tias Joana Darc e Cléia Maria pelo carinho e amor a mim transmitidos. A toda minha família só posso dizer meu muito obrigado. Eu amo todos vocês.

Meus agradecimentos aos professores do colegiado, principalmente ao Prof. Dr. José Luiz pela iniciação científica que me foi concedida. Em especial, agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Paulo César, pela paciência e dedicação e pelos conhecimentos repassados ao longo da graduação. A ele declaro minha profunda admiração.

Foi um imenso prazer passar tantas noites e madrugadas de estudos, brincadeiras e desesperos com aos meus colegas de universidade e, agora, de profissão: Raquel, Meriele, Raoni, Dimas, Helder, Mateus, Neurisnaldo e Bruno. Em específico, cito Raquel e Meriele pela amizade ímpar que construímos. Sou grata à Proej Consultoria e aos membros diretores pelos dois anos de aprendizado e trabalho e, principalmente, a Amanda, pessoa com quem tive as primeiras conversas sobre empresa júnior.

RESUMO

A logística empresarial apresenta uma abordagem ampla que busca atingir todos os níveis da cadeia de suprimentos de uma empresa. Nessa perspectiva, a mesma procura, através dos seus processos, aumentar a eficiência das atividades executadas e elevar o nível de serviço oferecido. Como subárea que vem ganhando especial destaque, a distribuição física tem o papel de levar os produtos certos para o lugar e momentos corretos ao menor custo possível e nas condições desejáveis. No cumprimento dessa função, a atividade de transporte absorve grande parte dos investimentos logísticos e é determinante na definição da estrutura de custos da empresa. Como ferramenta de apoio ao planejamento dos transportes surge a roteirização de veículos, processo no qual são projetados os melhores roteiros de entrega dos produtos. A roteirização delineia problemas e estes estão sujeitos a uma série de restrições ou características, dentre as quais se pode citar a janela de tempo (JT). Esta limitação define um problema amplamente estudado na literatura e foco desse trabalho de conclusão de curso, o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (PRVJT). Tal problema determina que deve existir um intervalo de tempo no qual o cliente deve ser visitado; supermercados de *shopping center* ou restaurantes são exemplos de clientes que necessitam ser atendidos em momentos pré-determinados. Como método de resolução foi adotado o Algoritmo de Clarke e Wright para obtenção da solução inicial. O referido estudo visou desenvolver um programa que ajudasse a determinar um conjunto de rotas e levasse em consideração restrições quanto à capacidade do veículo, à jornada de trabalho e, principalmente, às JTs definidas pelos clientes. Para a implementação utilizou-se o software de programação Delphi® 2010 e definiu-se as chamadas Estratégias de Melhoria como método de análise das JTs. Como resultado da pesquisa foi possível perceber, através dos testes de validação que, após a aplicação das estratégias, vários pontos passaram a ser visitados nos horários estabelecidos, apresentando, portanto, soluções satisfatórias. O desenvolvimento de novas estratégias de melhoria ou a adição de outras restrições representam possibilidades de trabalhos futuros que complementariam o presente estudo.

Palavras-chave: Distribuição física, transporte, problema de roteirização de veículos, janela de tempo, Clarke e Wright.

ABSTRACT

The logistics business provides a broad approach that seeks to reach all levels of the supply chain of a company. From this perspective, it aims, through its processes, to increase efficiency of the activities performed and raise the level of service offered. As subarea that has gained special prominence, the physical distribution has the role of bringing the right products to the right place and time at the lowest cost as possible and desirable conditions. In performing this function, the transport activity absorbs much of the logistical and investment and it is essential for determining the cost structure of the company. As a tool to support the planning of transport, the vehicle routing arises, process in which the best itineraries are designed for delivery of products. The routing outlines these problems and are susceptible to a number of constraints or features, among which we can mention the time window (TW). This limit defines a problem widely studied in the literature and focus of this work, the vehicle routing problem with time windows (VRPTW). This problem requires that there must be an interval of time in which the customer must be visited; supermarkets or shopping center restaurants are examples of clients that need to be met at pre-determined moments. As a method of resolution was adopted Clarke and Wright algorithm for obtaining the initial solution. This study aimed to develop a program that would help determine a set of routes and take into account restrictions on the ability of the vehicle, daily working hours and especially the time windows defined by customers. For implementation, it was utilized the programming software Delphi ® 2010 and set up calls Strategies for Improving as a method for analysis of time windows. As a result of the research, it was possible to see through the validation tests that after the implementation of the strategies, several points became popular in established schedules, presenting, therefore, satisfactory solutions. The development of new strategies for improving or adding other restrictions represents opportunities for future work that would complement the present study.

Keywords: Physical distribution, transportation, vehicle routing problem, time window e Clarke and Wright.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo esquemático do problema do caixeiro-viajante. 41

Figura 2: Integração entre dois clientes num roteiro compartilhado. 49

Figura 3: *Layout* do modelo desenvolvido - interface com o usuário.....57

Figura 4: Fluxograma de execução do modelo de roteirização desenvolvido. 58

Figura 5: Exemplo de arquivo .txt para leitura dos dados de entrada do modelo.....59

Figura 6: Indicação das Situações Previstas de acordo com as JTs.....61

Figura 7: Desenho esquemático da primeira iteração da estratégia de melhoria 1…63

Figura 8: Desenho esquemático da estratégia de melhoria 2 - iteração única.....63

Figura 9: Desenho esquemático da estratégia de melhoria 3. 64

Figura 10: Solução inicial (Algoritmo de CW) para uma roteirização com 20 pontos de demanda. 68

Figura 11: Configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 10 pontos. 69

Figura 12: Configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 10 pontos. 69

Figura 13: Configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 10 pontos. 70

Figura 14: Configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 10 pontos. 71

Figura 15: Configuração inicial (CW) obtida após as modificações das JTs. 73

Figura 16: Configuração obtida no 4º cenário após as modificações das JTs. 73

Figura 17: Resumo da solução inicial fornecida pelo Algoritmo de CW para uma roteirização com 20 pontos de demanda. 75

Figura 18: Resumo da configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 20 pontos. 76

Figura 19: Resumo da configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 20 pontos. 76

Figura 20: Resumo da configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 20 pontos. 77

Figura 21: Resumo da configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 20 pontos. 78

Figura 22: Detalhes da rota 2 antes de inserir a modificação. 79

Figura 23: Detalhes da rota 2 depois de inserir a modificação e antes da aplicação das estratégias. 79

Figura 24: Detalhes da rota 2 depois de inserir a modificação e depois da aplicação das estratégias. 79

Figura 25: Resumo da solução inicial fornecida pelo Algoritmo de CW para uma roteirização com 40 pontos de demanda. 82

Figura 26: Resumo da configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 40 pontos. 83

Figura 27: Resumo da configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 40 pontos. 84

Figura 28: Resumo da configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 40 pontos. 85

Figura 29: Resumo da configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 40 pontos. 85

Figura 30: Detalhes da rota 4 antes de inserir a modificação. 86

Figura 31: Detalhes da rota 4 depois de inserir a modificação e antes da aplicação das estratégias. 87

Figura 32: Detalhes da rota 4 depois de inserir a modificação e depois da aplicação das estratégias. 87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais características dos problemas de roteirização pura. 33
Quadro 2: Exemplos dos problemas básicos de roteirização pura. 34
Quadro 3: Problemas básicos de programação de veículos. 35
Quadro 4: Problemas básicos de programação de tripulação. 36
Quadro 5: Problemas de roteirização e programação. 37
Quadro 6: Taxonomia dos problemas de roteirização de veículos. 40
Quadro 7: Derivações do problema do caixeiro-viajante. 42
Quadro 8: Exemplo do tratamento dado ao horário. 62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Solução inicial (Algoritmo CW) para uma roteirização com 10 pontos de demanda. 67

Gráfico 2: Roteirização com 10 pontos de demanda - 1º cenário. 68

Gráfico 3: Roteirização com 10 pontos de demanda - 2º cenário. 69

Gráfico 4: Roteirização com 10 pontos de demanda - 3º cenário. 70

Gráfico 5: Roteirização com 10 pontos de demanda - 4º cenário. 71

Gráfico 6: Solução inicial (Algoritmo CW) - roteirização com 20 pontos de demanda. 75

Gráfico 7: Roteirização com 20 pontos de demanda - 1º cenário. 75

Gráfico 8: Roteirização com 20 pontos de demanda - 2º cenário. 76

Gráfico 9: Roteirização com 20 pontos de demanda - 3º cenário. 77

Gráfico 10: Roteirização com 20 pontos de demanda - 4º cenário. 77

Gráfico 11: Configuração da rota 2 após modificação.....80

Gráfico 12: Solução inicial (Algoritmo CW) para uma roteirização com 40 pontos de demanda. 82

Gráfico 13: Roteirização com 40 pontos de demanda - 1º cenário. 83

Gráfico 14: Roteirização com 40 pontos de demanda - 2º cenário. 83

Gráfico 15: Roteirização com 40 pontos de demanda - 3º cenário. 84

Gráfico 16: Roteirização com 40 pontos de demanda - 4º cenário. 85

Gráfico 17: Configuração da rota 4 após modificação.....88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software. 66

Tabela 2: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt). 67

Tabela 3: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário. 71

Tabela 4: Modificações adotadas. 72

Tabela 5: Resumo comparativo das penalidades após modificações das JT's. 73

Tabela 6: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt). 74

Tabela 7: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software. 74

Tabela 8: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário. 78

Tabela 9: Modificação adotada. 79

Tabela 10: Resumo comparativo das penalidades após modificação da JT. 79

Tabela 12: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software. 80

Tabela 11: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt). 81

Tabela 13: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário. 86

Tabela 14: Modificação adotada. 87

Tabela 15: Resumo comparativo das penalidades após modificação da JT. 87

LISTA DE ABREVIATURAS

(ARP) *Arc Routing Problems*

(CW) *Clarke e Wright*

(CSCMP) *Council of Supply Chain Management Professionals*

(JTs) Janelas de Tempo

(NRP) *Node Routing Problems*

(PCV) Problema do Caixeiro Viajante

(PRV) Problemas de Roteirização ou Roteamento de Veículos

(PRVJT) Problema de Roteirização de Veículos com Janela de Tempo

(VRPTW) V*ehicle Routing Problem with Time Windows*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS iv

RESUMO v

ABSTRACT v

LISTA DE FIGURAS vii

LISTA DE QUADROS ix

LISTA DE GRÁFICOS x

LISTA DE TABELAS xi

LISTA DE ABREVIATURAS xii

1. INTRODUÇÃO 15

1.1. Definição do Objeto de Estudo 17

1.2. Objetivos 19

1.2.1. Geral 19

1.2.2. Específicos 20

1.3. Justificativa 20

1.4. Estrutura do Trabalho 22

2. REFERENCIAL TEÓRICO 23

2.1. Logística Empresarial 23

2.2. Distribuição Física 25

2.3. Transportes 27

2.4. Roteirização de Veículos 28

2.4.1. Problemas de Roteirização de Veículos 30

2.4.1.1. Classificação dos Problemas 32

2.4.1.2. Restrições ou Condicionantes dos Problemas 38

2.4.1.3. Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e suas Derivações 41

2.4.1.4. Problema de Roteirização de Veículos com Janela de Tempo(PRVJT) 42

2.4.2. Métodos de Resolução para o PRV 44

2.4.2.1. Método das Economias de Clarke e Wright (CW) 47

2.4.2.2. Algoritmo do Método de CW 48

2.4.3. Aplicações dos PRVJT na Literatura 51

3. METODOLOGIA 52

3.1. Finalidade da Pesquisa 52

3.2. Tipologia da Pesquisa 53

3.3. Variáveis da Pesquisa 53

3.4. Delineamento da Pesquisa 53

3.4.1. *Software* Utilizado 54

3.4.2. Etapas da Pesquisa 54

3.4.3. Modelo de Roteirização Desenvolvido 56

3.4.3.1. Interface do Modelo 56

3.4.3.2. Fluxograma de Execução 58

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES 65

4.1. Validação do Modelo Desenvolvido 65

4.1.1. Problema com 10 Pontos de Demanda 66

4.1.2. Problema com 20 Pontos de Demanda 73

4.1.3. Problema com 40 Pontos de Demanda 80

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 89

5.1. Conclusões 89

5.2. Recomendações 91

REFERÊNCIAS 92

1. INTRODUÇÃO

Paradoxalmente, a logística é tida como uma das atividades mais antigas e um dos conceitos gerenciais mais modernos. Sobretudo, nos últimos anos, mudanças econômicas vêm transformando a visão que se tem sobre a logística, passando esta a ser entendida como uma fonte potencial de vantagem competitiva para as empresas (FLEURY, 2000).

Nesse contexto, a logística é definida, segundo Ballou (2006), como um processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de produtos, serviços e de informações referentes às atividades do ponto de origem até atingir o consumidor final, tendo, como objetivo fundamental, atender aos requisitos do cliente.

Pureza e Lazarin (2010) ressaltam que, dentre os diversos componentes do sistema logístico citados pelo Conselho de Profissionais da Administração da Cadeia de Suprimentos ou *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), as atividades voltadas para o transporte e distribuição dos produtos apresentam especial relevância.

Conforme Novaes (2004), a distribuição física remete ao desempenho de levar o produto certo, para o lugar e o momento certos, com o nível de serviço desejado e pelo menor custo possível. Tendo em vista que os custos logísticos representam, em média, 19% da receita total da empresa e que destes, cerca de 60% correspondem aos custos com transporte, qualquer redução nesses custos pode impactar significativamente nas margens e, portanto, nos lucros de uma companhia (FLEURY, 2000).

Diante do que foi exposto, Pureza e Lazarin (2010) afirmam que a necessidade de minimizar os custos com transporte fomentou o surgimento de problemas de roteirização ou roteamento de veículos (PRV), os quais buscam, através de um adequado dimensionamento e planejamento de rotas, atingir um melhor desempenho para um sistema logístico no tocante à distribuição física do produto.

Segundo Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (1999), um PRV pode ser entendido como a forma de determinar rotas ou roteiros ótimos para uma frota de veículos

estacionada em um ou mais depósitos com o intuito de atender um conjunto de clientes geograficamente dispersos.

Os PRV's são categorizados em problemas sem restrições e com restrições. Para problemas sem restrições, também chamados de problema do caixeiro viajante (PCV), a existência de poucos clientes a serem visitados no roteiro permite que o problema seja facilmente resolvido através da inspeção; no entanto, para uma quantidade elevada de pontos ou quando os mesmos apresentam uma distribuição mais complexa, a resolução demanda métodos mais sofisticados (NOVAES, 2004).

Tratando-se de PRV com restrições, são inúmeras as possibilidades de resolução. Ballou (2006) destaca dois métodos: o da varredura, o qual é mais simples e resolve mais rápido os problemas, e o das "economias", método mais complexo, enfrentando problemas mais práticos e produzindo soluções de maior qualidade sob uma gama mais ampla de situações.

Uma dessas situações pode envolver a programação de veículos que, segundo Cunha (1997), relaciona as restrições de tempo de um ou mais roteiros ao PRV. O mesmo autor define o problema de roteirização e programação de veículos como um problema de distribuição, onde veículos localizados em um depósito central devem ser programados para visitar clientes geograficamente dispersos, tendo, como um dos principais requisitos, a variável "tempo", ou seja, limitações de horários para o atendimento, início e fim da locação.

Esta característica particular define o chamado Problema de Roteirização de Veículo com Janelas de Tempo, do inglês, V*ehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW). Tais problemas levam em consideração que, definido um intervalo de tempo para o atendimento do cliente, caso a empresa não possa oferecer o serviço na hora especificada a demanda do cliente é rejeitada ou uma nova janela de tempo viável é fornecida ao mesmo (FAN, 2009).

Este tipo de problema reflete o crescente aumento nos níveis de exigência do consumidor em busca de um desempenho logístico cada vez melhor com entregas cada vez mais rápidas. A capacidade da prestação de serviço ao cliente, em termos de disponibilidade e atuação operacional, deve assegurar a sincronização das atividades com o intuito de satisfazer as necessidades de serviço almejadas (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2006).

Diante desse cenário, o algoritmo de Clarke e Wright, baseado no método das “economias”, apresenta-se como um procedimento amplamente utilizado na resolução de problemas isolados bem como aparece embutido dentro de muitos softwares de roteirização, pois o mesmo permite, de forma eficiente, incorporar vários tipos de restrições (NOVAES, 2004). Para Ballou (2006), este algoritmo consegue solucionar problemas com um número moderado de pontos relativamente rápido em termos computacionais, superando restrições práticas e gerando, assim, soluções quase ótimas.

1.1. Definição do Objeto de Estudo

A logística é composta pela integração de atividades de transporte, estocagem, armazenamento, manuseio de materiais e embalagens e pela gestão de informações. Ganhando maior destaque, as atividades de transporte são consideradas elementos chaves no processo decisório, principalmente, no tocante às decisões com relação à seleção do modal, a consolidação de embarques e a roteirização e programação de veículos (BOWERSOX; CLOSS, 1997).

Problemas reais de roteirização são definidos por três requisitos básicos: decisões, objetivos e restrições. As decisões estão voltadas à alocação dos recursos; os objetivos visam proporcionar ao cliente um serviço de alto nível, sem, é claro, elevar os custos operacionais e de capital; e as restrições proporcionam a este tipo de problema ser um reflexo da realidade (PARTYKA; HALL, 2000 citados por NOVAES, 2004).

A imposição de novas restrições torna cada vez mais difícil a elaboração de boas soluções para problemas de roteirização de veículos. Estas restrições podem ser de várias naturezas. Múltiplos caminhões com diferentes capacidades de peso e cubagem, distintas velocidades médias em diferentes zonas, intervalos para os motoristas, barreiras ao tráfego e janelas de tempo constituem alguns exemplos de considerações práticas que dificultam a elaboração do projeto de roteiro (BALLOU, 2006).

A roteirização com restrição a grades de horário ou janelas de tempo são problemas voltados às empresas que se comprometem a atender seus clientes em

horários programados, principalmente quando se trata de produtos perecíveis, onde a maior preocupação está relacionada ao atendimento às necessidades dos clientes, a partir de produtos que devem ser manuseados de forma especial, minimizando as perdas e desperdícios. Ou seja, as restrições de janela de tempo buscam identificar o intervalo de tempo durante o qual o cliente precisa ser visitado (DÁVALOS, 2006).

Dessa forma, o PRVJT permite, de acordo com Silva Júnior e Hamacher (2010), que cada cliente defina um intervalo de tempo durante o qual o serviço deve ser prestado, e neste intervalo é estabelecida uma hora de início e de fim do atendimento. Para Belfiore e Fávero (2006), além dos produtos perecíveis destacados por Dávalos (2006), o transporte de ônibus escolares, a programação de táxi, a coleta e entrega de correspondências são alguns exemplos práticos desse tipo de aplicação.

Em particular, para o PRVJT, os clientes estão interessados em janelas de tempo tão estreita quanto possível, enquanto que as empresas preferem intervalos maiores, pois uma janela de tempo menos restritiva permite à empresa uma maior flexibilidade para alterar a sequência das visitas, por exemplo. Por outro lado, uma janela de tempo estreita fornece ao cliente um melhor serviço. Muito embora seja difícil, a melhor alternativa nesse impasse será um compromisso entre ambos os objetivos (FAN, 2009).

Considerando que os fatores que definem tal problema são variáveis, Novaes (2004) ressalta que as restrições de tempo causam muitas vezes impactos consideráveis à solução do problema. Além disso, o mesmo autor salienta que essa característica dos problemas de distribuição frequentemente não é compreendida no momento de planejar um sistema de entrega de produtos.

Sendo a roteirização de veículos um processo que consiste em criar uma rota para cada veículo, especificando uma sequência dos pontos de entrega, Cunha (2000) afirma que trata-se de um problema de relevante complexidade matemática, pertencente à categoria NP-difícil[1]. Dessa forma, os problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo são também assim considerados por serem uma extensão do PRV (SOLOMON; DESROSIERS, 1988).

[1] Trata-se de problemas cuja complexidade para resolução aumenta exponencialmente com o aumento do número de pontos a serem roteirizados, podendo ser representada por c^n, onde c é uma constante e n é o número de nodos analisados.

Esta classe de problema, na visão de Estevam (2003), exige um esforço computacional muito grande para resolvê-lo até a sua otimalidade, sendo impossível de ser solucionado em tempo de processamento aceitável utilizando métodos exatos. A partir disso, Paula (2009) destaca a necessidade de utilizar métodos aproximados, ou seja, os métodos heurísticos passam a compor o principal foco de interesse para a resolução de PRV. De acordo com Cunha (1997), a heurística é um procedimento baseado na noção intuitiva, exigindo que o problema seja explorado de forma inteligente.

Uma das heurísticas que vem sendo bastante utilizada, principalmente em softwares de roteirização, é a de Clarke e Wright. Este método é baseado no conceito de ganho, permitindo ao mesmo alcançar uma economia de percurso. O algoritmo de Clarke e Wright, assim como outros, tem o objetivo de projetar roteiros que atendam às restrições de capacidade e tempo (jornada de trabalho) e, indiretamente, minimize a distância total percorrida (NOVAES, 2004).

Este trabalho de final de curso se propõe a responder o seguinte questionamento: É possível determinar um conjunto de rotas econômicas que atenda as necessidades dos clientes e leve em consideração restrições quanto à capacidade do veículo, jornada de trabalho e janela de tempo (agendamento de visitas)?

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Desenvolver um algoritmo que ajude a determinar um conjunto de rotas de veículos que atenda às necessidades dos clientes e leve em consideração restrições quanto à capacidade do veículo, jornada de trabalho e, principalmente, janela de tempo, contribuindo para o aumento do nível de serviço prestado aos mesmos.

1.2.2. Específicos

O objetivo geral desdobra-se nos seguintes objetivos específicos:

1. Implementar a restrição de janela de tempo ao método de Clarke e Wright utilizando a linguagem de programação Delphi;
2. Elaborar cenários que avaliem a qualidade das soluções obtidas e verifiquem distorções introduzidas no novo modelo em relação às soluções obtidas utilizando o método original de Clarke e Wright;
3. Realizar simulações em laboratório para problemas de roteirização com o intuito de validar o método implementado.

1.3. Justificativa

Tenkley (2008) explica que alguns fatores como custos mais acessíveis de transporte e comunicação possibilitaram uma ampliação do comércio, caracterizado pelo aumento da distância entre os locais de produção e consumo. Além disso, a globalização permitiu às empresas competir em nível internacional e ampliar seus canais de distribuição, podendo, assim, atender à crescente exigência do mercado consumidor no requisito distribuição de produtos e serviços.

Para uma empresa que trabalha em um mercado consideravelmente maior do que sua área de produção, o gerenciamento estratégico do sistema logístico deve ser entendido como uma atividade essencial (BALLOU, 1999). Tendo em vista que tais sistemas dependem de uma frota de veículos e estes, por sua vez, consomem recursos, um dos seus principais objetivos diz respeito ao controle dos custos dessa frota, cabendo à empresa decidir como carregar os veículos e quais serão os roteiros de cada um (SIMCHI-LEVI et al., 2005 apud TENKLEY, 2008).

Partindo-se da premissa que a logística deve atender às necessidades do cliente fundamentando-se numa base eficiente de custos, a decisão de como formar e utilizar as frotas pode ter grande impacto nos custos da empresa (BOWERSON; CLOSS; COOPER, 2006). Nessa perspectiva, Paula (2009) salienta que a

roteirização de veículos surge como uma alternativa para melhorar o nível de serviço prestado ao passo que se busca também alcançar uma economia dos custos de transporte.

A roteirização de veículos se relaciona com diversas subáreas da logística como, gestão de estoques, logística empresarial, transporte e distribuição física; além disso, uma vez que o problema proposto tem como objetivo implementar computacionalmente uma restrição, abrange também a pesquisa operacional.

De acordo com a ABEPRO (2008), estas duas áreas do conhecimento estão inseridas dentro do curso de Engenharia de Produção, já que a logística se refere às técnicas adequadas para resolver problemas de transporte, movimentação, estoque e armazenamento de insumos e produtos, objetivando a minimização dos custos, a garantia da disponibilidade do produto e o atendimento dos níveis de exigências do consumidor, enquanto que a pesquisa operacional, entre outras coisas, busca resolver problemas reais a partir de modelos matemáticos processados computacionalmente.

Tenkley (2008) explana que os PRV representam problemas com aplicação na vida real, envolvendo situações tanto de movimentação de produtos quanto de distribuição de serviços. O mesmo autor diz ainda que se trata de um problema que foi introduzido há mais de 40 anos e continua sendo relevante até hoje. No tocante às restrições de janela de tempo, Dávalos (2006) enfatiza que os PRVJT vem sendo amplamente estudados nas últimas décadas em função da sua aplicação prática como ferramenta de apoio à logística e aos transportes. Entretanto, Ballou (2006) afirma que encontrar boas soluções para estes problemas exige a aplicação de princípios de correta roteirização e programação ou de alguns procedimentos heurísticos lógicos.

O tema sugerido propôs basear-se, como ponto de partida para as soluções, no método de Clarke e Wright (CW), pois, conforme Novaes (2004), enquanto o método da varredura produz um erro médio de 10%, o de Clarke e Wright reduz esse nível a 2% do ótimo absoluto. Além disso, técnicas mais sofisticadas podem exigir o uso de computadores muito potentes, não disponível para o usuário médio (MORGAN; MUMFORD, 2005). Alvarenga e Novaes (2000) salientam ainda que o método de Clarke e Wright é um dos processos heurísticos mais conhecidos e

empregados na solução desse tipo de problema (sequenciamento de clientes a serem visitados).

Esta monografia tem sua relevância pautada na roteirização, sendo esta, segundo Dávalos (2006), uma ferramenta muito poderosa no controle da distribuição em geral, tanto no requisito redução dos custos para uma empresa como na efetivação do melhor relacionamento com os clientes – aumento do nível de qualidade do serviço prestado.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o trabalho, fazendo uma contextualização geral do estudo, da definição do problema, justificativa e os objetivos do mesmo.

No segundo capítulo é feita uma revisão teórica que norteia a pesquisa, fundamentada nos principais conceitos relacionados aos objetivos do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para execução do trabalho, a partir da descrição das características da pesquisa, bem como, a forma que a mesma foi delineada.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho, acompanhado de análises mais detalhadas.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa, além de recomendações para futuros trabalhos na área.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos que fundamentam o tema proposto neste trabalho, permitindo uma maior compreensão de assuntos como logística empresarial, distribuição física, transporte e roteirização de veículos. Dentro do último subitem, são feitas algumas considerações importantes quanto à roteirização de veículos com restrições de janela de tempo.

2.1. Logística Empresarial

A palavra Logística é definida pelo *Council of Logistics Management* como um conjunto de ações sistematizadas que visam planejar, implantar e controlar o fluxo eficiente e eficaz de produtos, serviços e informações, abrangendo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, tendo como objetivo final atender às exigências dos clientes. Este conceito representa uma moderna definição da logística baseada uma gestão integrada das atividades (BALLOU, 2006).

Nesse sentido, a logística, na visão de Fleury (2000), deixou de ser um centro de custos, uma simples atividade operacional, e passou a ser entendida como uma atividade de cunho estratégico diante de um mercado cada vez mais competitivo. Ballou (2006) acrescenta ainda que a logística passou a ser gerenciada como uma atividade de agregação de valor para os clientes e os fornecedores da empresa, sendo manifestada em termos de tempo e lugar, ou seja, os produtos e serviços apenas tem valor se os mesmos foram disponibilizados quando e onde os clientes pretendem consumi-los.

Novaes (2004) concorda com Fleury (2000) ao afirmar que a logística desempenha um papel de agregar valor, no entanto, para o autor, a moderna logística busca adicionar valor de lugar, de tempo, de qualidade e de informação, ao passo que visa também eliminar do processo atividades que não tenham valor para o cliente, ou seja, tudo que acarreta em custos e perda de tempo, aumentando a eficiência e melhorando os níveis de serviço oferecidos.

Segundo Ferreira e Ribeiro (2003), a principal meta da logística é garantir, por meio do gerenciamento das suas funções chaves (transporte, estoque, distribuição, localização, serviço ao cliente, entre outras), a disponibilidade de produtos, materiais ou serviços no mercado e em pontos consumidores, no tempo exato e na condição desejada ao menor custo possível.

Esses modernos conceitos da logística emergem de um campo relativamente novo, o qual entende que áreas tradicionais como finanças, marketing e produção devem ser geridas de forma integrada, originando, portanto, a logística empresarial. Seguindo esse pensamento, tem-se agora uma gestão coordenada das atividades inter-relacionadas, em substituição à prática histórica de administrá-las separadamente e do conceito que a logística agrega valor apenas para satisfazer os clientes e aumentar as vendas (BALLOU, 2006).

A logística empresarial apresenta uma visão integrada que sistematiza ações de cunho estratégico até o nível mais operacional, destacando a importância da colaboração da gestão de estoque e movimentação de materiais para o desempenho logístico. Em nível estratégico, a logística tem papel fundamental no desenvolvimento empresarial, passando a oferecer benefícios ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse contexto, as atividades primárias - transportes, gestão de estoques e processamento de pedido - são tidas como essenciais para o cumprimento da função logística, e as atividades secundárias - armazenagem, manuseio de materiais, programação de produtos e manutenção da informação – são tomadas como tarefas de apoio (MANFROI, 2008).

Um eficiente sistema logístico possibilita a uma região geográfica valorizar as vantagens do seu processo produtivo e exportar seus produtos para outras regiões. Em escala mundial, os sistemas logísticos eficientes formam bases econômicas para estruturar o comércio e realizar uma manutenção de um alto padrão de vida nos países desenvolvidos. Dessa forma, os custos logísticos desempenham uma função chave para estimular a comercialização dos produtos e serviços, apresentando importância fundamental num contexto global (BALLOU, 1993).

Conforme Manfroi (2008), a logística integra várias fases ou etapas nas empresas, e também integra várias empresas que buscam entre si o cumprimento de suas funções no contexto econômico. Em meio a isso, a distribuição física,

assunto que será abordado no próximo tópico, torna-se extremamente importante por ser uma atividade logística diretamente percebida pelo cliente.

2.2. Distribuição Física

Atualmente, a distribuição física de produtos vem ganhando destaque em meio aos problemas logísticos das empresas. Por um lado, essa mudança é devido ao aumento do custo de oportunidade, que obriga as empresas a reduzir seus estoques e agilizar os manuseios dos produtos, por outro, as novas exigências definidas pelos clientes finais têm demandado do mercado melhores níveis de serviços no atendimento. Decisões como a periodicidade das entregas, o número de zonas, o número de clientes atendidos por zona, e frota necessária, entre outras, são determinantes para que a melhoria na qualidade do serviço prestado seja traduzida, na prática, em entregas mais rápidas, confiabilidade, disponibilidade do produto na hora da compra, segurança, entre outros fatores (ALVARENGA; NOVAES, 2000).

Novaes (2004) explica que diferentes percepções funcionais são associadas à distribuição física, no entanto, no âmbito da logística, a distribuição de produtos engloba os processos operacionais e de controle, como assim são definidos. Para o autor, a distribuição física apresenta como objetivo geral a responsabilidade de disponibilizar o produto certo, no lugar certo, no tempo certo e com o nível de serviço almejado, pelo menor custo possível. Muito embora seja antagônico, oferecer um nível de serviço elevado e, em contra partida, reduzir custos, esse conceito de distribuição está atrelado à cadeia de valor orientada para o sistema como um todo, e não apenas a uma empresa específica.

Bose (1990), citado por Enomoto (2005), entende que a distribuição física compreende o deslocamento do produto a partir da fábrica até o consumidor, de forma direta ou via depósitos e que, para isso, os profissionais devem operar elementos como: depósitos, veículos, estoques, equipamentos de carga e descarga, entre outros. Sendo assim, segundo Enomoto (2005), a distribuição deve ser garantida em todos os componentes da cadeia de suprimento no prazo desejado e com a qualidade determinada.

Conforme Novaes (2004), o sistema de distribuição física de produtos é formado por componentes de caráter físico ou informacional, são eles:

- ✓ *Instalações fixas*, compreendendo os espaços destinados a abrigar os produtos;
- ✓ *Estoque de produtos* ao longo de todo o processo, ou seja, engloba os produtos acabados no depósito da fábrica, nos centros de distribuição dos atacadistas, nos distribuidores e varejistas, e o estoque em trânsito (nos veículos de transporte);
- ✓ Veículos;
- ✓ *Informações diversas,* como coordenadas geográficas para localização da empresa em um software de roteirização, intervalo de horário para entrega, quantidade de produtos a ser entregue, entre outras;
- ✓ *Hardware e software variados*, possibilitando um melhor planejamento, programação e controle das atividades de distribuição;
- ✓ *Estrutura de custos* adequada e atualizada;
- ✓ *Pessoal* devidamente capacitado e treinado em todos os níveis do sistema.

De acordo com Ballou (2001), o gerenciamento da distribuição física ocorre nos níveis estratégico, tático e operacional. O nível estratégico trata de decisões de longo prazo, as quais definem o sistema logístico da empresa como localização das instalações fabris e de armazenamento, escolhas dos canais de distribuição e dos modais de transporte, entre outras. O nível tático busca realizar um planejamento de médio prazo, voltando suas ações para atividades como planejamento de transportes e contratação de operadores logísticos, por exemplo. Por fim, o nível operacional envolve a programação, execução e o controle das funções diárias com o intuito de assegurar o deslocamento dos produtos nos canais de distribuição, no tempo desejado.

Segundo Moura (2000), as operações necessárias para a distribuição física de produtos incluem transporte, estocagem, carregamento e descarregamento, embalagem, processo de distribuição e gerenciamento de informações na distribuição de produtos. O autor salienta que, com a tendência de entregas de pequeno porte e de alta frequência, maior velocidade de transporte e exigências de entrega porta-a-porta, o transporte, assunto que será discutido em seguida, passou a consumir metade dos custos envolvidos na distribuição de produtos.

Novaes (2004) define que os sistemas de distribuição são divididos basicamente em duas situações:

- ✓ Distribuição “um para um”: um veículo é totalmente carregado (lotação completa) no depósito da fábrica, por exemplo, transportando a mercadoria para o ponto de destino;
- ✓ Distribuição “um para muitos” ou compartilhada: um veículo é carregado no centro de distribuição do varejista, por exemplo, compartilhando produtos de diversos clientes. Neste caso, as entregas devem ser efetuadas a partir de um roteiro predeterminado.

O autor afirma ainda que, especificamente, o primeiro sistema é bastante influenciado pelo chamado tempo porta a porta, enquanto que o segundo sistema sofre influência de decisões quanto ao número de zonas ou bolsões de entrega, distância entre o centro de distribuição e o bolsão e as velocidades operacionais dentro e fora do bolsão. Em termos gerais, ambos dependem de fatores como densidade da carga, forma de acondicionamento, disponibilidade de carga de retorno, tempo de carga e descarga, entre outros.

2.3. Transportes

Segundo Enomoto (2005), durante muito tempo a logística se resumiu na função transporte, no entanto, atualmente, os profissionais da área entendem que transportar vai além do translado de produtos de um ponto a outro na cadeia de suprimentos. Para Novaes (2004), o setor de transporte desempenha uma função-chave no gerenciamento do sistema logístico em função do seu impacto nos níveis de serviço ao cliente e na estrutura de custos da empresa.

Conforme Bowersox, Closs e Cooper (2006), o transporte apresenta como serviços principais: a movimentação de produtos, ou seja, o translado de inventários para o estágio seguinte do processo de negócio; e o armazenamento de produtos, pois mesmo que temporária, a carga está sendo estocada. De acordo com Caixeta-Filho e Martins (2001), o transporte tem a função econômica de promover a integração entre as sociedades produtoras e consumidoras de bens em geral, além também de permitir a expansão dos mercados.

Bowersox, Closs e Cooper (2006) salientam que existem dois princípios fundamentais que causam impactos significativos na eficiência dos transportes: economia de escala e economia de distância. Segundo os autores, a economia de escala, em transportes, é o custo por unidade de peso diminuído conforme aumenta o tamanho do embarque. Já a economia de distância, também conhecida como Princípio Atenuante, representa a redução do custo de transporte por unidade de peso à medida que aumenta a distância total percorrida.

Novaes (2004) afirma que o transporte de produtos desde as fábricas até os centros atacadistas e varejistas pode ocorrer por diversos modais: rodoviário, ferroviário, aquaviário, aeroviário e ductoviário para casos especiais, sendo a melhor opção aquela que corresponder ao menor custo total de transporte porta a porta atendendo, no entanto, os intervalos de entrega (janela de tempo). O mesmo autor salienta ainda a importância da conjugação ou integração física e operacional de duas ou mais modalidades de transporte, denominado de transporte intermodal, para se alcançar possíveis ganhos de custo, atendendo as exigências de prazos e de segurança necessárias.

Sinteticamente, o objetivo dos transportes é maximizar o tamanho da carga e a quilometragem percorrida, buscando ao mesmo tempo atender às expectativas dos clientes. As decisões de transporte são influenciadas por cinco participantes: embarcadores, destinatários, transportadores e corretores, governo e público. Estas decisões, por sua vez, são focalizadas na roteirização e programação dos veículos e dos equipamentos de transporte e pessoal (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2006).

2.4. Roteirização de Veículos

O entendimento do conceito de roteirização de veículos deve partir do esclarecimento do termo roteirizar. Basicamente, roteirização pode ser definido como um processo de determinação de uma ou mais rotas ou sequências de paradas a serem seguidas por uma frota de veículos, envolvendo, portanto, um conjunto de nós geograficamente dispersos, mas com localização estabelecida (PAULA, 2009). Conforme Christofines et al. (1979) citado por Paula (2009),

roteirização de veículos é um nome genérico dado à classe de problemas caracterizados por visitas aos clientes através de veículos.

A roteirização de veículos tem sido abordada de variadas maneiras e apresentado diferentes formulações, aplicações e estratégias de solução. Alguns exemplos que ocorrem com bastante frequência na distribuição de produtos e de serviços são: entrega, em domicílio, de produtos comprados nas lojas de varejo ou pela Internet; distribuição de produtos dos centros de distribuição para lojas de varejo; distribuição de bebidas nos bares e restaurantes; distribuição de combustível para postos de gasolina; coleta de lixo urbano; entrega domiciliar de correspondência, entre outros (NOVAES, 2004).

Anteriormente, o processo de roteirizar veículos baseava-se apenas na experiência do encarregado do depósito, ou seja, com o conhecimento das condições viárias e de tráfego da região atendida, o responsável elaborava os roteiros, indicando o número e a sequência de clientes a serem visitados. Ainda hoje, algumas empresas optam por esse tipo de conhecimento, no entanto, o desenvolvimento da informática nas duas últimas décadas permitiu o surgimento de *softwares* voltados a solucionar tais problemas. Embora muitos desses programas apresentem certa sofisticação, as diversas facetas dos problemas de roteirização não permitem, algumas vezes, que estes pacotes resolvam satisfatoriamente os problemas da empresa (ALVARENGA; NOVAES, 2000).

Paula (2009) explica que objetivo principal da roteirização de veículos é visitar “N” clientes, alocados em uma rede viária, disponibilizando de uma frota de “k” veículos ao menor custo possível, atendendo as restrições específicas de cada situação, tais como capacidade do veículo, jornada de trabalho, horários de atendimento ao cliente, entre outras. O autor salienta que, na prática, a roteirização de veículos possui uma vasta aplicabilidade, onde cada situação apresenta um aspecto distinto relacionado a vários fatores como o tipo de operação, o tipo de carga, o tipo de frota, dentre outros; todos definindo, portanto, as imposições do problema.

Os problemas de roteirização de veículos podem ser formulados como sendo problemas de programação linear inteira, pertencentes à categoria de problemas NP-difíceis. Isto significa que, à medida que o número de pontos a serem atendidos aumenta, cresce também, mas de forma exponencial, o esforço computacional para

resolvê-lo. Tendo em vista que, nem mesmo os mais potentes computadores disponíveis no mercado conseguem resolver problemas com muitas variáveis e um número elevado de restrições em tempo de processamento aceitável, a solução alternativa, geralmente, adotada é a utilização de heurísticas e meta-heurísticas que forneçam um resultado apropriado (WU, 2007).

2.4.1. Problemas de Roteirização de Veículos

Os problemas de roteirização têm tido um grande destaque nos últimos anos devido à sua vasta aplicabilidade e importância econômica na determinação de estratégias eficientes e eficazes no ramo da distribuição, apresentando, portanto, um intuito de reduzir custos operacionais do sistema (BELFIORE; FAVÉRO, 2006).

Os autores afirmam que o problema clássico de roteirização de veículos determina uma sequência de visitação proporcionando o menor custo possível e atendendo os seguintes pré-requisitos: cada nó deve ser visitado uma única vez por um único veículo, a frota de veículos deve iniciar e terminar suas rotas no depósito e a demanda de todos os nós deve ser atendida. Além disso, caracteriza-se por apresentar uma demanda determinística, onde os veículos possuem capacidade limitada.

Daválos (2006), baseando-se em Brinatti (1995), concorda com Belfiore e Favéro (2006) ao apontar que as principais características de um problema de roteirização de veículos são:

- ✓ Cada veículo deve realizar seu roteiro determinado, iniciando e finalizando sua rota em um depósito;
- ✓ Cada rota deve atender um conjunto de clientes com demandas conhecidas e cuja soma não ultrapasse a capacidade do veículo designado para a rota;
- ✓ Os custos de roteirização constituem uma parte do custo total de distribuição;
- ✓ A composição dos outros custos, associados ao veículo, estão relacionados à aquisição e manutenção da frota.

Silva (2010) define, em sua tese de doutorado, algumas variantes do PRV como:

- ✓ Problema do roteamento de veículos periódico: apresenta como princípio um período de planejamento realizado não para um dia, mas para “d” dias;
- ✓ Problema de roteamento de veículos capacitados: neste tipo de problema é disponibilizada uma frota de veículos com capacidade uniforme para atender à demanda, para um tipo de um produto, para um depósito comum a um custo mínimo de trânsito;
- ✓ Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega: Considera entrega e coleta de produtos, onde todas as entregas, em cada rota, devem ser realizadas antes de qualquer coleta já que as mercadorias coletadas seriam armazenadas na parte traseira e o rearranjo das cargas sobre os trilhos nos pontos de entrega não é considerada viável;
- ✓ Problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos: admite-se que a empresa possui múltiplos depósitos para atender à demanda. No entanto, se for possível formar grupos de clientes em torno dos depósitos, o problema deve ser modelado como um PRV independente;
- ✓ Problema de roteamento de veículos com entregas particionadas: é um relaxamento do PRV, no qual é permitido que um mesmo cliente seja atendido por veículos distintos, caso seja possível reduzir os custos globais e caso os pedidos excedam a capacidade dos veículos.

A grande parte dos problemas de roteirização de veículos é baseada em conceitos oriundos da teoria dos grafos (PAULA, 2009). Dessa forma, cada roteiro é representando por um grafo G (N, A), onde N é um conjunto contendo todos os nós e representado os clientes e o(s) depósito(s) com índices *i* e *j*, e A é outro conjunto formado por todas as arestas compreendendo os caminhos de pares ordenados *ij* de acesso aos clientes, sendo associado a cada par um custo de percurso c_{ij} (SILVA-JÚNIOR; HAMACHER, 2010).

Conforme Ballou (2006), o problema de roteirização e programação de veículos é uma extensão do problema básico de roteirização. Em linhas gerais, todo problema de roteirização e programação de veículos apresenta um ponto de partida, ou seja, para cada veículos ou tripulante deve ser determinado uma rota e um programa, onde o roteiro especifica os locais a serem visitados e o programa identifica os horários em que as visitas ocorreram (NARUO, 2003).

Baseado em outros autores, Enomoto (2005) afirma que a programação (do inglês *scheduling*) de veículos busca determinar os aspectos temporais de um ou mais roteiros, ou seja, busca especificar o horário em que cada tarefa deve acontecer. Esta programação de veículos é aplicada também para agendar operações de atendimento em que um determinado cliente é priorizado, representando, assim, uma configuração temporal. Ainda conforme o autor, este problema pode envolver os horários de saída e retorno ao depósito, chegadas e partidas dos nós da rota, sendo que estes estão diretamente relacionados aos tempos de duração dos atendimentos e aos tempos de viagem ou deslocamento entre os pontos sequenciados nos roteiros.

2.4.1.1. Classificação dos Problemas

Quanto à classificação dos problemas de roteirização de veículos, Paula (2009) afirma que adotar uma classificação adequada e uma visão sistêmica dos principais tipos de problema é fundamental para a correta manipulação dos parâmetros que influenciam na modelagem e na solução dos mesmos.

A classificação estabelecida por Bodin *et al.* (1983) é a tomada por diversos autores como Enomoto (2005), Paula (2009) e Naruo (2003). De acordo com Cunha (2003), apesar do trabalho de Bodin *et al.* (1983) ser relativamente antigo, ainda hoje representa uma das principais referências bibliográficas que discorrem sobre o assunto.

A classificação também adotada pelos autores propõe analisar os problemas em função de restrições geográficas e espaciais, dividindo assim os problemas em três grupos:

- ✓ Problemas de roteirização pura;
- ✓ Problemas de programação de veículos e tripulações;
- ✓ Problemas combinados de roteirização e programação de veículos.

Conforme Paula (2009), nos problemas de roteirização pura inexistem restrições temporais relacionadas ao horário de atendimento dos clientes ou à precedência entre eles. Trata-se de problema espacial que apresenta como objetivo

apenas construir um conjunto de roteiros viáveis e de custos mínimos, um para cada veículo. O Quadro 1 sintetiza as principais características dos problemas básicos de roteirização pura. Para Naruo (2003), os casos clássicos de problemas de roteirização pura são o caixeiro viajante, o carteiro chinês e suas respectivas variações, como exibe o Quadro 2.

Quadro 1: Principais características dos problemas de roteirização pura.

Problema	**Nº de roteiros**	**Localização dos clientes**	**Limite de capacidade do veículo**	**Nº de bases**	**Demanda**
Caixeiro Viajante	Um	Nós	Não	Uma	Determinística
Carteiro Chinês	Um	Arcos	Não	Uma	Determinística
Múltiplos Caixeiros Viajantes	Múltiplos	Nós	Não	Uma	Determinística
Roteirização em nós: único depósito, vários veículos	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Determinística
Roteirização em nós: vários depósitos, vários veículos	Múltiplos	Nós	Sim	Múltiplas	Determinística
Roteirização em nós: único depósito, vários veículos e demanda estocástica	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Estocástica
Carteiro Chinês Capacitado	Múltiplos	Arcos	Sim	Uma	Determinística

Fonte: Enomoto (2005, p. 39).

Quadro 2: Exemplos dos problemas básicos de roteirização pura.

Problema	Descrição
Caixeiro Viajante	Consiste em determinar uma rota de mínimo custo que passe por todos os nós de uma rede exatamente uma vez. É um problema de cobertura de nós. Se o custo for simétrico, ou seja, se o custo de viajar entre dois nós não depende da direção da viagem, é o caso de problema simétrico, de outra forma, é problema de caixeiro viajante assimétrico ou direcionado.
Carteiro Chinês	Este caso requer a determinação de uma rota e custo mínimo que passe por todos os arcos de uma rede, pelo menos uma vez. É problema de cobertura de arcos. Este problema é chamado direcionado ou não-direcionado, dependendo se o arco é ou não direcionado.
Múltiplos Caixeiros Viajantes	É uma generalização do problema do caixeiro viajante na qual é necessário se considerar mais de um caixeiro viajante (ou veículos). Os M veículos da frota originam e terminam suas rotas de um depósito comum. Não há restrições sobre o número de nós que cada um pode visitar, exceto que cada veículo visite, no mínimo, um nó.
Roteirização em nós: único depósito, vários veículos	É conhecido como problema clássico de roteirização de veículo (PRV). É uma generalização do problema do caixeiro viajante, onde a frota de veículos parte de um depósito central e serve a todos os nós, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida.
Roteirização em nós: vários depósitos, vários veículos	É uma generalização do problema anterior, com vários depósitos, ao invés de um. Neste problema, cada veículo é alocado a um único depósito, ou seja, origina e termina a viagem no mesmo depósito.
Roteirização em nós: único depósito, vários veículos e demanda estocástica	É idêntico ao PRV, exceto que a demanda não é conhecida com certeza, assim ela pode originar de uma distribuição de probabilidade específica.
Carteiro Chinês Capacitado	É uma generalização do problema do carteiro chinês, onde há a restrição de capacidade dos veículos.

Fonte: Naruo (2003, p.66).

Para os problemas de programação de veículos e tripulações são admitidas restrições adicionais de tempo quando várias atividades precisam ser realizadas. Esses problemas dividem-se em dois: problemas de programação de veículos e de tripulações, onde o primeiro preocupa-se com o sequenciamento das operações de cada veículo e o segundo, com a movimentação da tripulação, ambos no tempo e no espaço (ENOMOTO, 2005). O Quadro 3 ilustra os problemas básicos de programação de veículos.

Quadro 3: Problemas básicos de programação de veículos.

Problema	Descrição
Um único depósito	Consiste no particionamento dos nós (tarefas) de uma rede acíclica em um conjunto de rotas, de maneira que uma determinada função custo seja minimizada. Cada rota corresponde à programação de um veículo. Uma função objetivo que minimiza o número de rotas, efetivamente minimiza os custos de capital desde que o número de veículos necessários seja igual ao de rotas.
Restrições de tamanho de rota	Estes problemas consistem nas considerações de restrições de tempo e distância máxima de viagem, que na prática, representam a necessidade de reabastecimento e manutenção de veículos.
Múltiplos tipos de veículos	Consideram as diferentes características dos veículos para realizarem as tarefas. Normalmente a característica considerada é a capacidade do veículo.
Múltiplos depósitos	Consiste em problemas com veículos que realizam tarefas a partir de diferentes depósitos. Os veículos devem sair de e chegar ao mesmo depósito e para o tamanho da frota de cada depósito deve se especificar um mínimo e o máximo.

Fonte: Naruo (2003, p.68).

Conforme o modelo de classificação estabelecido por Bodin *et al.* (1983) e citado por Enomoto (2005), existem restrições determinantes na definição da complexidade do problema no mundo real: (1) limite de tempo que um veículo pode estar em serviço antes de retornar ao depósito, (2) determinadas tarefas que só podem ser executadas por veículos específicos e (3) a presença de diferentes depósitos.

No tocante à programação de tripulação, em termos gerais, é bastante semelhante à de veículos, contudo normalmente envolve restrições mais complexas, como parada para refeição de funcionários, regulamentação trabalhista, entre outras (NARUO, 2003). No Quadro 4 podem ser vistos alguns exemplos desse tipo de problema.

Por fim, os problemas combinados de roteirização e programação de veículos apresentam restrições de janela de tempo e/ou precedência entre atividades. É importante ressaltar que, conforme o autor que definiu essa classificação, este tipo de problema reflete as situações reais, sendo mais comum na prática (PAULA, 2009). O Quadro 5 expõe os principais problemas combinados de roteirização e programação.

Quadro 4: Problemas básicos de programação de tripulação.

Problema	Descrição
Programação de pessoal para um local fixo	Neste problema divide o dia de trabalho em *T* períodos e especifica-se uma demanda para cada trabalhador para cada período de tempo. Procura-se encontrar um conjunto de programas com trabalhadores para cobrir todas as tarefas. É assumido que pode haver intercâmbio entre os trabalhadores, e que cada trabalhador pode ser desalocado no final de um período de trabalho e que outro pode ser alocado ao serviço em cada começo de um período.
Programação de veículos e tripulação em transporte público	Consiste em determinar a alocação ótima de veículos a um conjunto de viagens programadas de linhas, e determinar também as jornadas de trabalho das tripulações, considerando que as trocas de serviço e de turno só podem ser realizadas em pontos específicos de trajeto das linhas.
Programação de tripulação no transporte aéreo	É semelhante à programação de tripulações em veículos, uma vez que as tabelas de horários de partida e chegada das rotas aéreas nos diversos pontos são definidas a priori e, portanto, conhecidas e determinadas.
Programação de pessoal em turnos de revezamento	Consiste na programação diária variando de um dia para o outro, havendo um rodízio de turno de pessoal, em função de restrições trabalhistas, e equilíbrio do esforço de trabalho, etc.

Fonte: Naruo (2003, p.68).

Quadro 5: Problemas de roteirização e programação.

Problema	Descrição
Ônibus escolares	Consiste no problema de um grupo de escolas, cada qual com seu conjunto de paradas de ônibus que tem vinculado, para cada ponto, um dado número de estudantes e uma janela de tempo correspondente aos horários para pegar os alunos nas paradas e leva-los até a escola. O principal objetivo é minimizar os custos de transporte para o município.
Caminhões: Cavalo mecânico – carreta com carga completa	O termo carga completa significa que a carga é engatada ao cavalo mecânico e é transportado direto da origem ao destino. A carga na carreta tem um único destino. A capacidade do cavalo mecânico corresponde apenas a uma carreta. Este problema envolve restrições de precedência.
Caminhões: Cavalo mecânico – carreta com carga parcial	Semelhante ao anterior, mas a carga não precisa ser completa. Assim, a carga da carreta pode ser separada entre diferentes origens e destinos.
Serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas	Semelhante ao problema do carteiro chinês, porém com restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo associadas aos horários de proibição de estacionamento, de forma a possibilitar a execução do serviço de varrição. Em geral, o objetivo consiste na minimização da frota ou um objetivo correlato, por exemplo, de minimização do tempo morto total, para uma frota conhecida.
Dial-a-ride: transporte especial de pessoas	Sistema em que o transporte é solicitado pedindo por telefone. Cada usuário tem local de origem e destino diferentes e, eventualmente horário e faixas horárias de saída e chegada. A precedência entre as tarefas é uma restrição decisiva para a viabilidade da solução.

Fonte: Adaptado de Naruo (2003, p.69).

Existem outras abordagens com relação à classificação dos problemas de roteirização de veículos. Enomoto (2005) explica que estes problemas, mesmo apresentando todas as suas variações, podem ser basicamente reduzidos segundo dois aspectos: *origem* e *destino* do trajeto e *tipo de modelagem*.

Quanto à *origem* e ao *destino*, Ballou (2006) estabelece três definições: problemas contendo um ponto de origem e um ponto de destino diferentes; problemas com múltiplos pontos de origem e de destino, havendo, assim, a necessidade de combinar os destinos com as fontes e de encontrar as melhores rotas entre eles; e problemas em que os pontos de origem e destino são coincidentes, sendo este um problema ainda mais complexo.

No que diz respeito ao *tipo de modelagem*, Enomoto (2005) salienta que os problemas de roteirização podem ser divididos em duas classes básicas: problema de roteirização em nós ou *Node Routing Problems* (NRP), onde os locais de atendimento são representados por pontos específicos; e problema de roteirização

em arcos ou *Arc Routing Problems (ARP*), neste caso os locais são representados continuamente ao longo de uma rede viária, chamada de arcos ou arestas.

Paula (2009) menciona em seu trabalho a classificação de Ronen (1988), a qual está dividida em três classes relacionadas com o ambiente operacional e com o objetivo. As classes são: problemas envolvendo o transporte de passageiros, geralmente, sistemas de transporte de ônibus, táxi, transporte escolar, entre outros; problemas de prestação de serviço, normalmente, prestados à comunidade como coleta de lixo e entrega de correspondência; e problema de roteirização e programação de carga.

De forma geral, todas as classificações de problemas apresentadas são definidas a partir de restrições, algumas mais simples e outras mais complexas. Essas limitações serão discutidas no próximo tópico.

2.4.1.2. Restrições ou Condicionantes dos Problemas

Dávalos (2006) afirma que, para se determinar um roteiro ideal de entregas ou visitas, alguns fatores básicos devem ser considerados, dispor de: (1) uma malha viária previamente definida (mapa com as ruas e coordenadas); (2) um conjunto de nós; (3) uma frota de veículos; (4) um conjunto de restrições relacionadas à malha; e (5) uma demanda de entrega ou coleta.

Como já citado anteriormente, Novaes (2004) estabelece 3 (três) dimensões para tratar de problema de roteirização, enquanto que Belfiore (2006) *apud* Paula (2009) define 4 (quatro): função objetivo, restrições, variáveis de decisão e hipóteses/recursos.

A *função objetivo* reflete a meta que se pretende alcançar com a resolução do problema. As principais naturezas de objetivos são:

- ✓ Minimizar os custos globais (fixos e variáveis) de distribuição;
- ✓ Minimizar a distância total percorrida;
- ✓ Minimizar o tamanho da frota de veículos, maximizando a utilidade da mesma no tocante ao atendimento do nível de serviço prestado ao cliente.

A dimensão *restrição*, como o próprio termo indica, restringe o problema nos seguintes principais aspectos:

- ✓ Restrições de veículos (capacidade do veículo, número de veículos);
- ✓ Restrições com os clientes (atendimento total ou parcial da demanda, prioridade no atendimento de clientes, tempo determinados para carga e descarga);
- ✓ Restrições das rotas (tempo máximo de viagem de um veículo, locais de parada).

Ainda na visão do autor, os parâmetros que se destacam como *variáveis de decisão* são:

- ✓ Roteiros a serem seguidos pela frota de veículos;
- ✓ Seleção do melhor tipo de veículo;
- ✓ Quantidade demandada por cada cliente da rota.

Por fim, as principais *hipóteses/recursos* que caracterizam o problema são:

- ✓ Tipo de operação (colega, entrega, coleta e entrega simultaneamente);
- ✓ Tipo de carga (carga única ou carga fracionada);
- ✓ Tipo de demanda (determinística, estocástica);
- ✓ Localização da demanda (em arcos, em nós ou em ambos);
- ✓ Tamanho (limitado ou ilimitado) e composição (homogêneo ou heterogêneo) da frota;
- ✓ Estrutura da rede (direcionada, não direcionada, mista ou euclidiana).

Araújo (2008) cita em seu trabalho as diversas características ou condicionantes, para a taxonomia aplicáveis aos problemas de roteirização de veículos na visão de Bodin *et al.* (1983), ilustradas no Quadro 6.

Além de todas as limitações já citadas, Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (2001) consideram também as chamadas restrições de precedência. Estas imposições, por sua vez, admitem que determinados clientes não sejam visitados antes que outros sejam. Os autores destacam que é uma situação bastante comum em problemas que ocorrem entrega e coleta de produtos simultaneamente.

Quadro 6: Taxonomia dos problemas de roteirização de veículos.

Características	Possibilidades
1. Tamanho da frota disponível	- Um único veículo - Vários veículos
2. Tipo de frota disponível	- Homogênea - Heterogênea - Veículos especiais (ex: compartimentalizados)
3. Localização da frota de veículos	- Um único depósito - Múltiplos depósitos
4. Natureza da demanda	- Determinística - Probabilística - Satisfação parcialmente da demanda
5. Localização da demanda	- Nos nós (não necessariamente em todos) - Nos arcos (não necessariamente em todos) - Em ambos
6. Restrições temporais da demanda	- Ausente - Janelas de tempo rígidas - Janelas de tempo flexíveis - Combinação de janelas de tempo rígidas e flexíveis
7. Característica da rede	- Rede não-direcionada - Rede direcionada - Rede mista - Rede euclidiana
8. Restrições de capacidade do veículo	- Ausente - Iguais para todos os veículos - Diferentes para cada veículo
9. Restrições de tempo máximo de rotas	- Ausente - Rotas com mesmo tempo máximo - Rotas com diferentes tempos máximos
10. Tipos de operações	- Somente coletas - Somente entregas - Mistas - Com ou sem desmembramento de carga
11. Custos	- Variáveis - Fixos - Custos por violação de restrições - Custos por não atendimento de demanda
12. Objetivos	- Minimizar os custos totais de roteirização - Minimizar a soma dos custos fixos e variáveis - Minimizar o número de veículos - Maximizar a função objetivo baseada em nível de serviço ou conveniência - Maximizar função objetivo baseada em prioridades do usuário

Fonte: Araújo (2008, p. 7).

2.4.1.3. Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e suas Derivações

De acordo com Cook (2005) citado por Araújo (2008), o primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o problema do caixeiro-viajante (do inglês *traveling salesman problem*), sendo formulado pelo economista Karl Menger na década de 20, em Viena. Trata-se de um problema que visa determinar a melhor sequência de cidades a serem visitadas pelo vendedor, esta sequência deve representar a menor distância possível e garantir que cada cidade seja visitada uma única vez (WU, 2007).

Para Enomoto (2005), o PCV parte da formulação que o caixeiro viajante deve visitar “N” pontos ou nós, saindo de um depósito ou base e passando em, pelo menos, “N-1” pontos, voltando para o ponto de partida ao final da viagem, conforme mostra a Figura 1. O autor ressalta ainda que este tipo de problema não apresenta restrições de tempo nem limitações de capacidade.

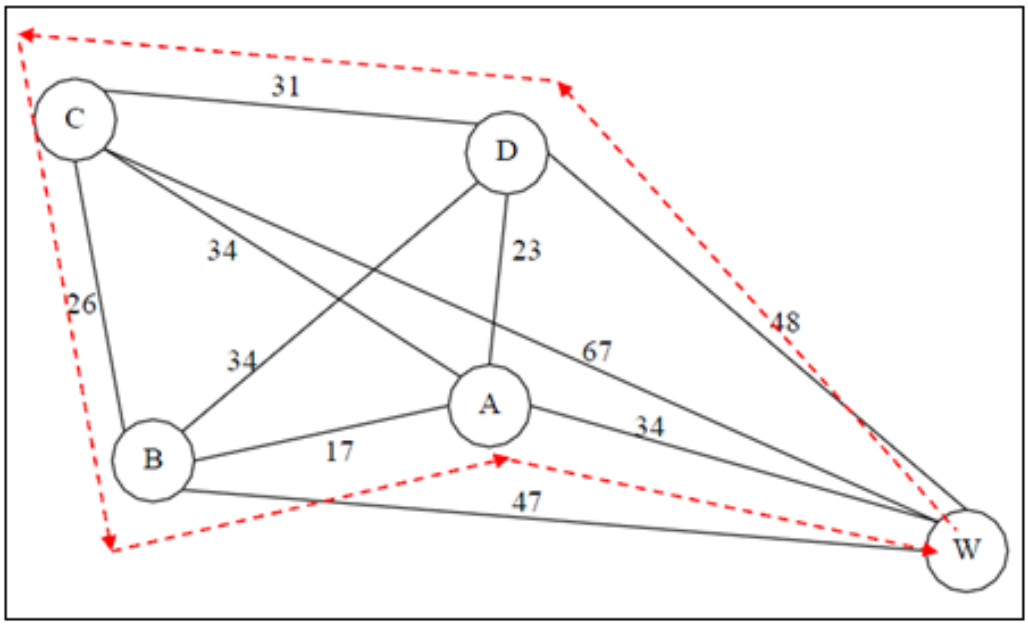


Figura 1: Exemplo esquemático do problema do caixeiro-viajante.
Fonte: Enomoto (2005, p. 38).

Araújo (2008) acrescenta que, com o passar do tempo, novas restrições foram sendo incorporadas ao problema do caixeiro-viajante com a finalidade de melhor representar os diferentes problemas da realidade que envolvem pessoas, veículos e cargas. Goldbarg e Luna (2000), citado por Paula (2009), mencionam problemas advindos desse problema original. O Quadro 7 lista alguns exemplos.

Quadro 7: Derivações do problema do caixeiro-viajante.

Tipo	Descrição
PCV Simétrico	Se a distância de ir de um nó qualquer "i" para outro nó qualquer "j" for igual a distância de sair de "j" para "i", então diz-se que o problema é simétrico.
PCV Generalizado	Esse tipo de problema leva em consideração o agrupamento dos nós para gerar um ciclo hamiltoniano. Assim, quando todos os nós do agrupamento são visitados passa a se ter um PCV clássico.
PCV com *Backhauls*	Esse é um problema particular do PCV Generalizado, onde são formados dois grupos de nós: grupo L (*linehauls*) e grupo B (*backhauls*), com o intuito que os nós do grupo L sejam visitados primeiros que os do grupo B.
PCV com Janela de Tempo	Cada nó "i" de uma rede G = (V, E) é estabelecido uma janela de tempo $[a_i, b_i]$, onde a_i indica a hora inicial do atendimento e b_i, a hora final.
PCV Múltiplo	Esse problema admite não um, mas vários caixeiros viajantes de tal forma que, cada um visite um grupo de clientes diferente do outro.
PCV com Gargalo ou MinMax	O objetivo do problema é obter um ciclo hamiltoniano tal que seu arco de maior comprimento seja mínimo.
PCV com Bônus	Nesse problema, a cada ponto "i" é associado um bônus b_i, onde o objetivo consiste em determinar um roteiro hamiltoniano de comprimento mínimo, tal que o retorno total obtido em bonificação nos nós seja pelo menos igual a certo valor (p) estipulado.
PCV Seletivo	Sendo mais uma variação, admite grupos de clientes que devem ser visitados pelo mesmo caixeiro, no entanto, um novo grupo só deve ser visitado quando finalizados os nós do grupo anterior.
PCV Estocástico	É um modelo em que os elementos constitutivos (restrições) podem apresentar uma distribuição probabilística que definirão um valor, ou seja, os elementos são determinísticos.
PCV Min Max-Min Sum	Trata-se de uma composição do problema clássico com o de gargalo.

Fonte: Adaptado de Paula (2009, p. 26-29).

2.4.1.4. Problema de Roteirização de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT)

De acordo com Dávalos (2006), o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo apresenta-se como uma das variações do PRV mais

implementadas e conhecidas da literatura inglesa. Lau, Sim e Teo (2003) salientam que o PRVJT tem sido objeto de intensa pesquisa desde os anos 80.

Este problema é definido formalmente como um grafo não-direcionado G (V; A), sendo V = { v_0, v_1,..., v_n}, onde v_0 é o depósito e v_i, com $i \neq 0$, é um cliente com demanda d_i, janelas de tempo (a_i, b_i) e serviço de duração s_i.; e A = { v_i, v_j, $i \neq j$, v_i, $v_j \in V$}, onde cada arco (v_i, v_j) é associado a um tempo de viagem t_{ij} e a um veículo com capacidade Q. O problema tem como objetivo encontrar um conjunto mínimo de rotas de partida e término no depósito de tal forma que cada cliente é servido por exatamente um veículo dentro de suas janelas de tempo, a soma das demandas de cada veículo seja inferior a Q, e a distância total percorrida seja minimizada (LAU; SIM; TEO, 2003).

Dávalos (2006) afirma que este problema deve ser formulado considerando a seguinte definição básica:

- ✓ Dado que um serviço apresenta um tempo de execução s_i, a janela de tempo para cada cliente é definida como [a_i, b_i], onde a_i é o horário mais cedo e b_i, o horário mais tarde para se realizar a prestação do serviço;
- ✓ Se o veículo chegar antes do horário definido por a_i, ficará esperando e, portanto, na ociosidade;
- ✓ Caso o veículo chegue após o horário definido por b_i, o cliente não poderá ser atendido, acarretando, assim, em custos por não atender a demanda.

Para Silva (2010), os limites de horário para o atendimento do serviço são definidos por uma janela de tempo [a_i, b_i], com $a_i < b_i$, de tal forma que o horário de término do serviço não esteja condicionado ao limite superior da janela de tempo e sim ao horário de início do atendimento.

Belfiore e Fávero (2006) subdividem os PRVJT em dois outros tipos de problemas: problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo flexíveis e problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo rígidas. O primeiro admite que as restrições de janela de tempo podem ser violadas mediante o pagamento de penalidades, enquanto que o segundo não permite estas ressalvas. Dessa forma, ainda segundo os autores, em algumas situações o objetivo do modelo passa a ser: minimizar a distância total percorrida e as punições pagas em função do não atendimento às restrições de janela de tempo.

Lau, Sim e Teo (2003) afirmam que a maioria dos algoritmos propostos assume um número de veículos ilimitado. Em seu trabalho foi desenvolvido uma variação do PRVJT, na qual a frota de veículos passa a ser considerada limitada. Segundo os autores, este é um tipo de problema mais realista na logística, diferentemente de problemas no qual a frota é ilimitada.

2.4.2. Métodos de Resolução para o PRV

Enomoto (2005) salienta que, nas últimas décadas, tem se observado um crescimento na busca por desenvolver métodos de soluções de rotas e de programação de veículos em função da necessidade apresentada pelas empresas de consolidar cargas de entrega e/ou coleta e reduzir seus custos.

Para Laporte (1992), os problemas de roteirização de veículos podem ser resolvidos, basicamente, por meio de duas estratégias distintas: algoritmos exatos e soluções heurísticas. Araújo (2008) explica que os métodos exatos permitem a obtenção da solução ótima e exata, no entanto, demandam um elevado tempo de resolução computacional. Em contrapartida, os métodos heurísticos não garantem uma resolução ótima, no entanto, proporcionam um menor custo computacional e, geralmente, atendem as necessidades nas aplicações reais devido a sua engenhosidade e eficiência.

Em um dos seus trabalhos, Laporte et al. (2000) citado por Araújo (2008) classificam os métodos heurísticos em heurísticas clássicas e heurísticas modernas. De acordo com Pelizaro (2000), as primeiras são subdivididas em: heurísticas de construção; heurísticas de duas fases; e heurísticas de otimização incompleta. O autor destaca a heurística das economias de Clarke e Wright (1964) e da varredura de Gillet e Miller (1974) como os principais métodos dentro das duas primeiras subdivisões, respectivamente. A heurística de otimização incompleta exige, geralmente, a aplicação sucessiva de dois métodos: um método de construção e outro de melhoria iterativa.

Silva (2010) define, na sua tese de doutorado, que a heurística indica uma descoberta, sendo, geralmente, utilizada para expressar o conhecimento empírico desenvolvido pelo homem para auxiliar no processo decisório. O autor salienta que

as heurísticas caracterizam-se por serem procedimentos de busca capazes de encontrar soluções aproximadas de boa qualidade em tempo computacional razoável. Já uma meta-heurística, conforme Oliveira (2004), é um procedimento de busca estratégico capaz de guiar outras heurísticas para encontrar soluções de qualidade, ou até mesmo ótimas, em tempo admissível.

Pelizaro (2000) aborda em seu trabalho as estratégias e métodos de soluções definidos por Bodin *et al.* (1983). Para este autor as estratégias de soluções para os problemas de roteirização de veículos são classificadas da seguinte forma:

1) Agrupa – Roteiriza (*cluster first – route second*): consiste no método de agrupar os nós ou arcos primeiro, e depois construir rotas para cada grupo com custos mínimos.
2) Roteiriza – Agrupa (*route first – cluster second*): inicialmente, é formado um grande ciclo ou rota, no qual são incluídas todas as demandas nos nós ou arcos, e depois esta grande rota é dividida em rotas menores e factíveis.
3) Economias ou Inserções: é um procedimento de construção que se baseia na comparação da configuração em construção, possivelmente infactível, com uma configuração alternativa que deverá ser infactível também, esta última é aquela que apresentar a maior economia com relação a alguma função ou critério estabelecido anteriormente. Por fim, o processo de construção é finalizado com uma configuração factível.
4) Melhoria/Troca: é um método heurístico também conhecido como troca de arcos ou arestas. Esta troca tem o intuito de alterar uma solução factível por outra também factível, mas com custo total reduzido. Sempre que seja possível minimizar o custo, as arestas são permutadas. Este procedimento é também conhecido como r-opt, onde r é o número de arcos trocados a cada iteração.
5) Programação Matemática: requer algoritmos que são diretamente baseados em uma formulação matemática de problemas de roteirização subordinados.
6) Otimização interativa: a experiência do tomador de decisões é fundamental, dessa forma, neste método há um alto grau de interação humana influenciando o processo de solução. São selecionados parâmetros para as revisões, os quais se baseiam no conhecimento e na intuição do modelo de otimização.

7) Procedimentos exatos: são métodos que incluem técnicas especializadas de *branch and bround*, programação inteira mista e programação linear inteira.

Em se tratando dos problemas de roteirização de veículos com janela de tempo rígidas ou flexíveis, como assim são classificados, Belfiore e Fávero (2006) listam alguns métodos aplicados em cada situação. No caso de problemas com janelas de tempo rígidas tem-se:

- ✓ Entre os métodos exatos, o autor menciona o algoritmo *branch and bound* utilizado por Kolen *et al.* (1987), onde o objetivo é determinar para um frota de veículos homogênea um conjunto de rotas factíveis com o intuito de minimizar a distância total percorrida, respeitando as restrições de janela de tempo e capacidade do veículos.
- ✓ Com relação aos métodos heurísticos o autor destaca o trabalho de Solomon (1987), onde foi possível desenvolver sete heurísticas construtivas: heurística de economia, heurística de economia com limite de tempo de espera, heurística do vizinho mais próximo com orientação temporal, heurística de inserção I1 (com critério que minimiza o acréscimo de tempo e distância causados pela inserção de um cliente), heurística de inserção I2 (com critério que minimiza o tempo e a distância total da rota), heurística de inserção I3 e heurística da varredura com orientação temporal. O modelo tem, como meta, minimizar a distância total percorrida e o tempo total das rotas, o que inclui também os tempos de espera. A heurística de inserção I1 apresentou os melhores resultados.
- ✓ Dentre as meta-heurísticas, Tan *et al.* (2001) implementaram algumas como busca tabu, *simulated annealing* e algorítmos genéricos, onde o objetivo era minimizar a distância total percorrida, respeitando restrições de capacidade dos veículos, de janela de tempo e de duração máxima da jornada de trabalho. A solução inicial foi obtida pela heurística de inserção de Solomon (1987) e os resultados finais, segundo os autores, superam ou igualaram algumas soluções já encontradas na literatura.

Ainda conforme Belfiore e Fávero (2006), alguns métodos aplicados agora em problemas com janelas de tempo flexíveis são apresentados por Balakrishman (1993):

- ✓ Esse autor apresentou três heurísticas: a do vizinho mais próximo, a das economias e a heurística de tempo-espaço, onde os problemas caracterizavam-se por apresentar frota homogênea e ilimitada, restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo flexíveis. O modelo buscava minimizar o tempo total das rotas e as penalidades de não cumprimento das janelas de tempo. O autor salienta que, permitindo-se o relaxamento das janelas de tempo, é possível diminuir significativamente o número de veículos necessários e/ou a distância total e o tempo gasto para percorrer o roteiro.

De forma geral, conforme Lau, Sim e Teo (2003), a maioria das heurísticas publicadas recentemente para os PRVJT apresentam duas fases. Primeiro, uma heurística de construção é usada para gerar uma solução inicial possível, e em seguida, uma heurística de melhoria iterativa é aplicada à solução inicial.

2.4.2.1. Método das Economias de Clarke e Wright (CW)

Segundo Laporte (1992), o método das economias de Clarke e Wright foi proposto pela primeira vez em 1964 para resolver problemas em que o número de veículos é livre. Resumidamente, o autor explica que o procedimento inicia-se com rotas de veículos, as quais contêm um depósito e outro vértice representando um cliente, em seguida, um ponto ou uma rota pode ser mesclada a uma rota já existente a depender do ganho ou poupança gerado.

Este método basea-se no conceito de ganho, o qual representa uma economia na distância percorrida em duas situações hipotéticas. Em outras palavras, representa o ganho de distâncias que pode ser obtido ao atender dois pontos de forma sucessiva num roteiro, ou seja, sem retornar ao depósito (GRANEMANN et al., 2007 apud PAULA, 2009).

O método de Clarke e Wright é bastante aplicado, com muito sucesso, na resolução de problemas isolados, mas também é utilizado por muitos softwares de roteirização. Assim como outros métodos de roteirização, o método de Clarke e Wright apresenta o objetivo de gerar roteiros considerando imposições de tempo e de capacidade, ao passo que busca-se minimizar a distância total percorrida pela

frota (NOVAES, 2004). No entanto, segundo Laporte (1992), o método implicitamente desconsidera os custos fixos do veículo e o tamanho da frota.

Inúmeras são as perguntas que podem ser feitas com relação às restrições do problema, por exemplo, se o tempo previsto de percurso ultrapassou o tempo máximo da jornada de trabalho, se o tempo para descanso ou refeição do motorista foi atendido, se há disponibilidade de veículo com capacidade suficiente para o carregamento máximo da rota, se a janela temporal do atendimento foi respeitada (BALLOU, 2006).

Com o intuito de entender o processo de construção dos roteiros, será explicado, na sequência, o procedimento que deve ser adotado para a aplicação do algoritmo em questão.

2.4.2.2. Algoritmo do Método de CW

Pelizaro (2000) explica que algoritmos são geralmente procedimentos passo a passo para se resolver um dado problema. Normalmente, a indicação do algoritmo "mais eficiente" está relacionada à sua rapidez de resolução, ou seja, o tempo gasto para um algoritmo solucionar um problema indica se o mesmo será utilizado ou não na prática.

Neste trabalho, optou-se pelo algoritmo de Clarke e Wright (1964), pois, segundo Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (1999), trata-se de um método simples e que de fato fornece bons resultados. O algoritmo adotado será explicado conforme abordagem de Novaes (2004).

O algoritmo de Clarke e Wright parte da pior situação possível, ou seja, supondo que dois clientes *i* e *j* precisam ser atendidos, o veículo sai do centro de distribuição abastecido com a mercadoria do cliente *i*, e após realizar essa entrega o veículo retorna ao CD para abastecer-se com a mercadoria do cliente *j*. Dessa forma, o veículo realiza dois roteiros, percorrendo o trajeto esquematizado na Figura 2a e representado pela Equação (1), onde $d_{D,i}$ e $d_{D,j}$ são as distâncias entre o depósito e os clientes *i* e *j*.

$$L = 2 \times d_{D,i} + 2 \times d_{D,j} \qquad \text{Equação (1)}$$

Baseando-se no conceito de ganho, o método busca uma melhoria através da junção de rotas, ou seja, inserir o cliente j na primeira rota de forma que passe a existir um único roteiro (Figura 2b). Sendo assim, o veículo percorreria uma distância total L' descrita na Equação (2):

$$L' = d_{D,i} + d_{i,j} + d_{D,j} \qquad \text{Equação (2)}$$

O método entende que, ao integrar os roteiros dos clientes *i* e *j*, tem-se uma economia de percurso, também chamado de ganho (g), igual à diferença entre L – L', ou seja:

$$g_{i,j} = L - L' = d_{D,i} + d_{D,j} - d_{i,j} \qquad \text{Equação (3)}$$

Ao se escolher os pontos que farão parte do mesmo roteiro, procura-se selecionar aquele cliente que proporciona o maior ganho $g_{i,j}$. Contudo, quando algumas combinações, mesmo permitindo um maior ganho, não respeitam as restrições de tempo e de capacidade impostas ao problema, tornam-se infactíveis.

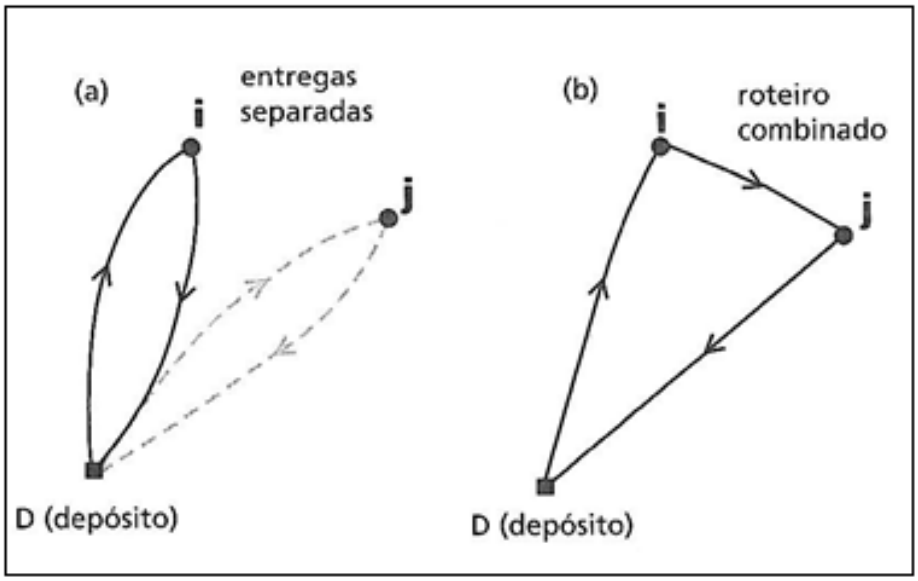


Figura 2: Integração entre dois clientes num roteiro compartilhado.
Fonte: Novaes (2004, p.301).

Ao analisar a Equação (3) é possível identificar duas propriedades nessa relação de ganho: o ganho tende a crescer quando os pontos *i* e/ou *j* se afastam do centro de distribuição, já que as parcelas $d_{D,i}$ e $d_{D,j}$ apresentam valores positivos; e o ganho tende a crescer quando os pontos *i* e *j* estão mais próximos, tendo em vista que a parcela $d_{i,j}$ tem valor absoluto menor.

A partir desse entendimento inicial sobre ganho, o qual embasa o algoritmo de Clarke e Wright, o método inicia-se com a análise de todas as combinações possíveis dois a dois entre os nós. O passo seguinte é dispor todas as possibilidades em ordem decrescente dos ganhos $g_{i,j}$. Dessa forma, os maiores

ganhos tendem a ser compostos por pontos próximos entre si e distantes do centro de distribuição. Esquematicamente, o algoritmo de Clarke e Wright compreende seis etapas:

Etapa 1: São realizadas todas as possíveis combinações dois a dois entre os pontos e calculados seus respectivos ganhos através da Equação (3).

Etapa 2: Os ganhos $g_{i,j}$ acompanhados da identificação dos pares (pontos i e j) são ordenados do maior para o menor.

Etapa 3: Depois da ordenação, dá-se início à análise das combinações sempre seguindo a sequência de ganhos estabelecida.

Etapa 4: Para um determinado par de pontos (*i*, *j*) deve ser analisado se os pontos já fazem parte de algum roteiro iniciado, de forma que:

(a) Se *i* e *j* não fazem parte de nenhum roteiro já iniciado, deve-se criar um novo com esses pontos;

(b) Se o ponto *i* já faz parte de um roteiro iniciado, verificar de esse ponto é o primeiro ou o último do roteiro (não considerar o centro de distribuição). Se o ponto encontra-se em qualquer uma das extremidades, acrescentar o par de pontos (*i*, *j*) a extremidade indicada (primeiro ou último). A mesma análise deve ser feita para o ponto *j*. Caso nenhum dos pontos satisfaça esta condição individualmente, passar para o item (c).

(c) Se os pontos *i* e *j* já fazem parte de um roteiro, no entanto, roteiros distintos, verificar se ambos são extremidades nos respectivos roteiros. Caso a resposta seja positiva, fundir os dois roteiros, senão, passar para a etapa 5;

(d) Se os dois nós (*i*, *j*) fazem parte de um mesmo roteiro, passar para a etapa 5.

Etapa 5: A cada ponto acrescentado a um roteiro ou a cada junção de dois roteiros, analisar se esta nova configuração respeita as restrições de tempo e de capacidade. Se a nova configuração não atender as limitações o roteiro torna-se infactível.

Etapa 6: A análise termina quando todos os clientes são inseridos em um determinado roteiro.

2.4.3. Aplicações dos PRVJT na Literatura

De acordo com Ribas (2011), o PRVJT, foco de sua dissertação, é um dos problemas mais importantes de otimização combinatória e mais estudados na literatura da pesquisa operacional. Na formulação do problema proposto pelo autor, foi considerado que “n” pontos precisam ser visitados por uma frota homogênea de k veículos, e cada ponto corresponde a um cliente com janela de tempo conhecida. Nesse estudo, buscou-se minimizar o custo de viagem, representado pela distância convertida em unidades de tempo, por meio um procedimento heurístico híbrido, o qual se demonstrou bastante competitivo frente às abordagens atuais.

Da mesma forma, Qing, Fuying e Jinlin (2010) formularam um PRVJT no qual um conjunto de “n” pontos precisa ser visitado, as distâncias e tempos de deslocamento entre os pontos são conhecidos e cada cliente possui uma janela de tempo dentro da qual o cliente deve ser atendido. Neste estudo, a violação da janela de tempo não é permitida, ou seja, o cliente deve ser atendido no intervalo de tempo negociado, caracterizando um problema com janela de tempo rígida. Além disso, a restrição de capacidade do veículo não é considerada, admitindo-se, portanto, veículos com capacidade ilimitada. No mais, o problema consiste em encontrar um conjunto de rotas com custo mínimo, tal que cada veículo inicie e termine sua rota no depósito.

3. METODOLOGIA

Esse capítulo visa expor o procedimento metodológico que foi aplicado neste trabalho de monografia. A fim de permitir uma melhor compreensão do mesmo, objetivou-se caracterizar a pesquisa quanto às suas finalidade e tipologia, ambas descritas conforme a literatura pesquisa. Em seguida, serão apresentadas as variáveis e o delineamento do estudo.

3.1. Finalidade da Pesquisa

Cervo, Bervian e Silva (2007) enfatizam a distinção entre pesquisa pura e pesquisa aplicada. Na pesquisa pura, também chamada de pesquisa básica ou fundamental, o objetivo é satisfazer uma necessidade intelectual por meio do aprendizado; Andrade (2009) completa ainda afirmando que este tipo de pesquisa é realizado por cientistas e contribui para o progresso da ciência. Já a pesquisa aplicada, conforme os autores acima mencionados, tem o intuito de contribuir para a busca de soluções de problemas concretos, atendendo assim às exigências da vida moderna.

Tendo em vista que os conceitos explanados, este trabalho final de curso é motivado por um interesse pessoal em adquirir um maior conhecimento sobre o tema abordado, no entanto, o estudo fundamenta-se em um caráter operacional do dia-a-dia das empresas, já que, como dito anteriormente por Dávalos (2006), os problemas de roteirização de veículos com restrições de janela de tempo vem sendo bastante estudados como ferramenta de apoio à logística e aos transportes. Sendo assim, o referido trabalho apresenta finalidade de pesquisa aplicada.

3.2. Tipologia da Pesquisa

De acordo com Cervo, Bervian e Silva (2007), a tipologia da pesquisa pode ser classificada quanto à sua natureza e quanto ao seu procedimento. No tocante à natureza, a pesquisa pode constituir-se em: trabalho científico original ou resumo de assunto (ANDRADE, 2009). Segundo a autora, o trabalho científico original compreende as novas conquistas e descobertas para a evolução do conhecimento; por outro lado, o resumo de assunto, o qual caracteriza esta pesquisa, fundamenta-se em trabalhos mais avançados, não se limitando à simples cópia de ideias.

Com relação ao procedimento, Koche (2009) destaca três principais tipos de pesquisa: a bibliográfica, a experimental e a descritiva. Esse trabalho de monografia pode ser classificado como experimental, pois, conforme o autor, este tipo de pesquisa caracteriza-se pela manipulação de possíveis variáveis referentes a um objeto de estudo. Gil (2002) destaca que a pesquisa experimental constitui-se de três propriedades básicas: a manipulação das variáveis estudadas, o controle da situação experimental e a distribuição aleatória na escolha dos elementos participantes dos grupos experimentais e de controle.

3.3. Variáveis da Pesquisa

Tendo em vista a natureza de um PRVJT, as variáveis analisadas na pesquisa são: a carga demandada por cada cliente, o tempo de deslocamento e a distância entre os pontos que possuem demanda, a janela de tempo referente ao intervalo para o horário de atendimento e o tempo de carga/descarga do caminhão em cada ponto.

3.4. Delineamento da Pesquisa

Este tópico busca esclarecer, de modo mais específico, a sequência dos procedimentos adotados na realização desse estudo. Inicialmente contempla-se

o software utilizado para implementação, seguido de uma apresentação das etapas de execução da pesquisa e, por fim, é explanado o processo de desenvolvimento do modelo de roteirização proposto.

3.4.1. *Software* Utilizado

Para implementação computacional, através de uma linguagem de programação, do modelo proposto foi escolhido o software Delphi® 2010 desenvolvido pela empresa Embarcadero Technologies. De acordo com o tutorial do software disponibilizado pelos desenvolvedores, o Delphi® 2010 apresenta como vantagens a possibilidade de criar aplicações visuais eficientes com um mínimo de codificação manual, isso por que trata-se de um compilador voltado à orientação de objetos, facilitando a criação de interface com o usuário.

Particularmente, além de esse compilador oferecer um grande número de componentes visuais e não visuais disponíveis em sua biblioteca, possui também funções matemáticas mais robustas. Outro aspecto que motivou a escolha deste programa foi a facilidade de se estabelecer interface com bancos de dados, o que contribui, significativamente, na obtenção e armazenagem dos dados de entrada e na manipulação das informações processadas.

3.4.2. Etapas da Pesquisa

Conforme Cervo, Bervian e Silva (2007), qualquer espécie de estudo exige inicialmente uma pesquisa bibliográfica, sendo essa fundamental para compreender o *estado da arte* do tema e para dar o embasamento necessário à justificativa das contribuições do próprio trabalho. Por isso, foi iniciada uma revisão bibliográfica para elaboração do projeto de pesquisa, sendo essa concluída durante a elaboração do trabalho final de curso em função da necessidade de ajustes.

Este trabalho apresenta, como foco, a análise das janelas de tempo, ou seja, o atendimento do cliente em um intervalo de horário específico. Sendo assim, o

estudo tomou como base uma configuração inicial de roteirização fornecido pelo algoritmo de Clarke e Wright (CW). A escolha deste método se deu por motivos já apresentados e, muito embora existam métodos mais sofisticados, o algoritmo em questão atende às necessidades deste trabalho.

Paralelo ao segundo momento da pesquisa bibliográfica, seria iniciada a implementação computacional do algoritmo de CW. Contudo, optou-se nesse instante por utilizar o trabalho de Gama (2011), pois a implementação do código deste autor no tocante ao algoritmo de CW, ou seja, desconsiderando a melhoria desenvolvida no referido estudo, foi implementada conforme a literatura de Novaes (2004), assim como exige este trabalho. Além disso, o código em questão apresenta-se devidamente validado, o que facilita a execução do presente trabalho, já que o foco não é o algoritmo de CW, e sim as JTs.

Dessa forma, a segunda etapa foi caracterizada inicialmente pela análise da solução de roteirização fornecida pelo método escolhido a partir de problemas formulados como PRVJT. Nessa fase, foram selecionados 3 problemas e a estes foram atribuídas janelas de tempo rígidas obedecendo os seguintes horários: 08:00 às 10:00, 10:00 às 12:00, 14:00 às 16:00 e, por fim, 16:00 às 18:00. De acordo com a literatura de Fan (2009), uma janela de tempo com duração de duas horas garante tanto um bom nível de serviço para o cliente como também permite à empresa disfrutar de uma flexibilidade considerável.

O objetivo dessa análise foi identificar os pontos que, coincidentemente, tiveram suas janelas de tempo atendidas mesmo sem considerar, na solução inicial gerada pelo CW, tal imposição como restrição. Para tanto, foi definido um parâmetro chamado penalidade, o qual busca avaliar o horário de chegada do veículo no ponto em relação a sua JT. Este parâmetro possibilitou, além dessa análise, a implementação das estratégias de melhorias para o atendimento das JTs.

A fim de inserir tais estratégias no código de Gama (2011) algumas adaptações se fizeram pertinentes. Como dito anteriormente, a configuração inicial não considerou para roteirização a JT como uma das restrições, por isso, o segundo momento dessa etapa constituiu-se na implementação dessa restrição. Após concluir essa etapa, foram feitos ajustes no *layout* do sistema de roteirização desenvolvido, visando melhorar a interface com o usuário.

Por fim, na terceira e última etapa da pesquisa, o modelo desenvolvido foi testado em cenários predefinidos, visando validar o mesmo e verificar se a melhoria implantada foi eficaz.

Todos os procedimentos acima descritos foram realizados no Laboratório de Simulação de Práticas Empresariais da Universidade Federal do Vale do São Francisco, localizado no campus Juazeiro-BA.

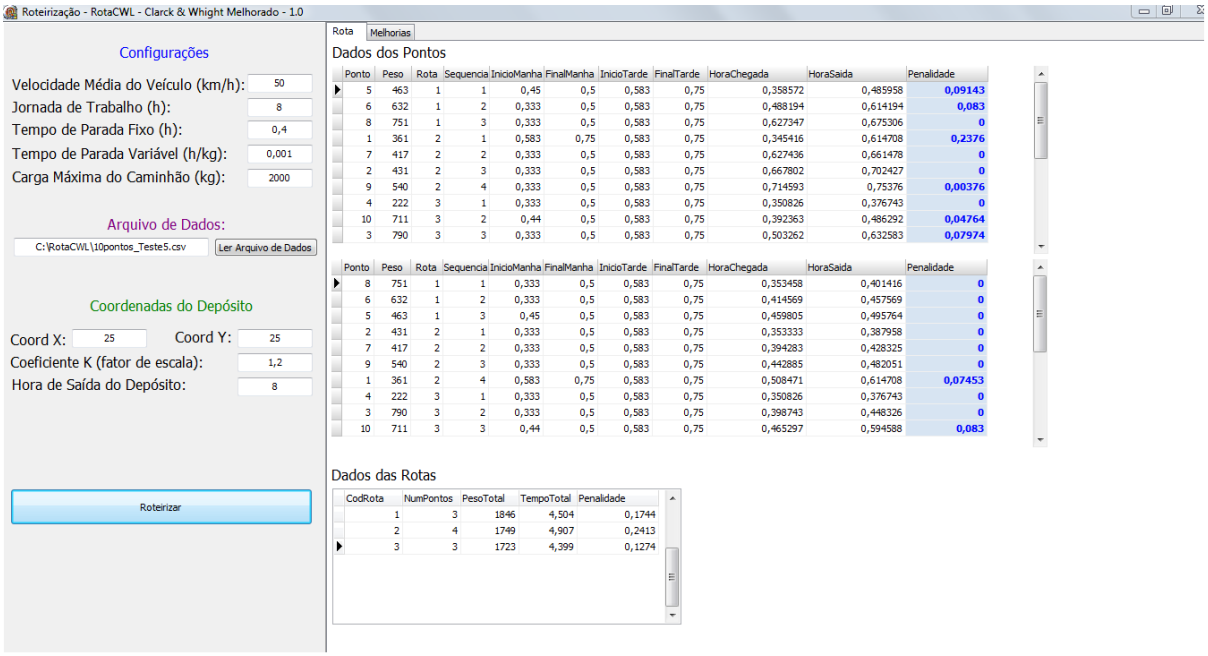
3.4.3. Modelo de Roteirização Desenvolvido

Neste item será feita uma apresentação do fluxograma de execução do modelo desenvolvido com o intuito de facilitar a compreensão da implementação do código. Essa explicação será acompanhada com uma descrição da *interface* do modelo com o usuário e das estratégias de melhorias para análise das JTs. Estes esclarecimentos são fundamentais para a evolução do raciocínio do estudo.

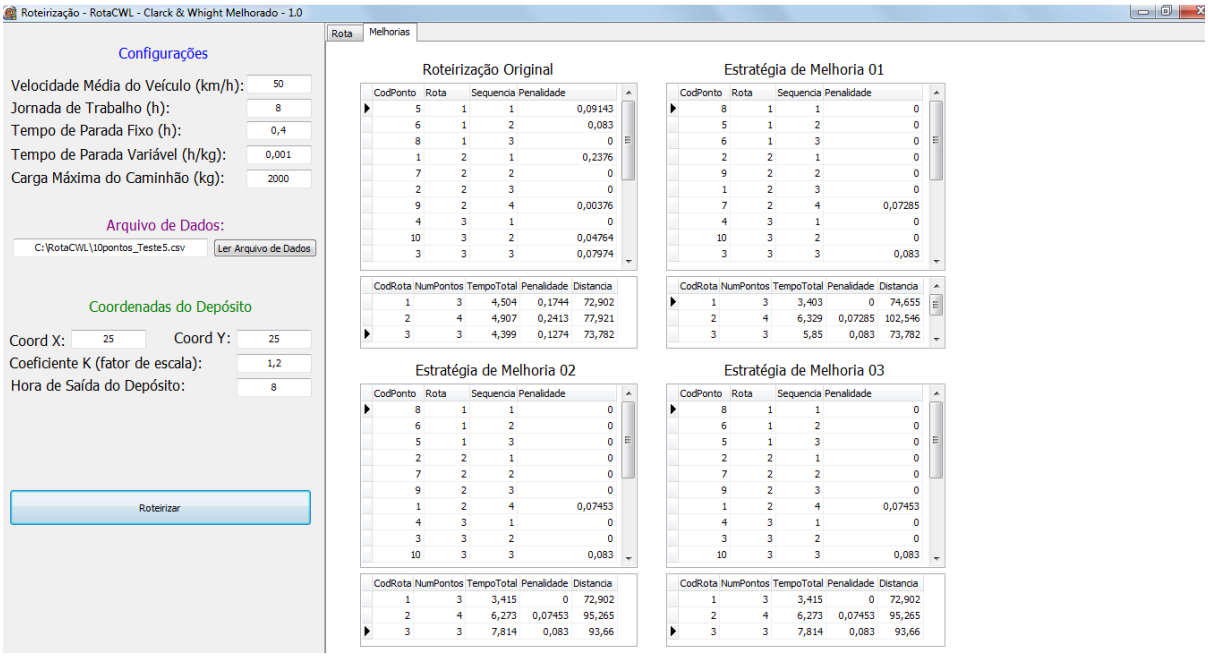
3.4.3.1. Interface do Modelo

O layout do software foi formulado de tal forma que o usuário consiga facilmente inserir os dados necessários a roteirização. Como pode ser observado na Figura 3, o lado esquerdo permite ao usuário inserir dados como a velocidade média e a capacidade do veículo, a jornada de trabalho, os tempos de parada fixo e variável, as coordenadas do depósito, o fator de escala (K) e o horário de saída do depósito. A interface ainda possui dois botões: Ler Arquivo de Dados e Roteirizar. O primeiro permite que o usuário acesse a base de dados (arquivo.*txt*) com os dados dos pontos de demanda; enquanto que o segundo, é o comando que faz o modelo iniciar a roteirização. O lado direito da Figura 3-A, indica a aba “Rota” e apresenta três quadros, no primeiro são exibidas todas as informações da solução inicial referente a cada ponto, inclusive horário de chegada e saída do mesmo e sua respectiva penalidade; no segundo, são mostradas as informações após a aplicação

das estratégias; e no último, é exibido um resumo por rota. O lado direito da Figura 3-B, informa resultados parciais após a aplicação de cada estratégia.



(A)



(B)

Figura 3: *Layout* do modelo desenvolvido - interface com o usuário.
Fonte: Produzido pela autora.

3.4.3.2. Fluxograma de Execução

Como dito anteriormente, o modelo proposto neste trabalho foi desenvolvido no *software* Delphi® 2010 a partir da linguagem de programação Delphi. Esse foi elaborado, basicamente, com a implementação de dois módulos: o Algoritmo de CW e as Estratégias de Melhorias, como podem ser visualizados na Figura 4.

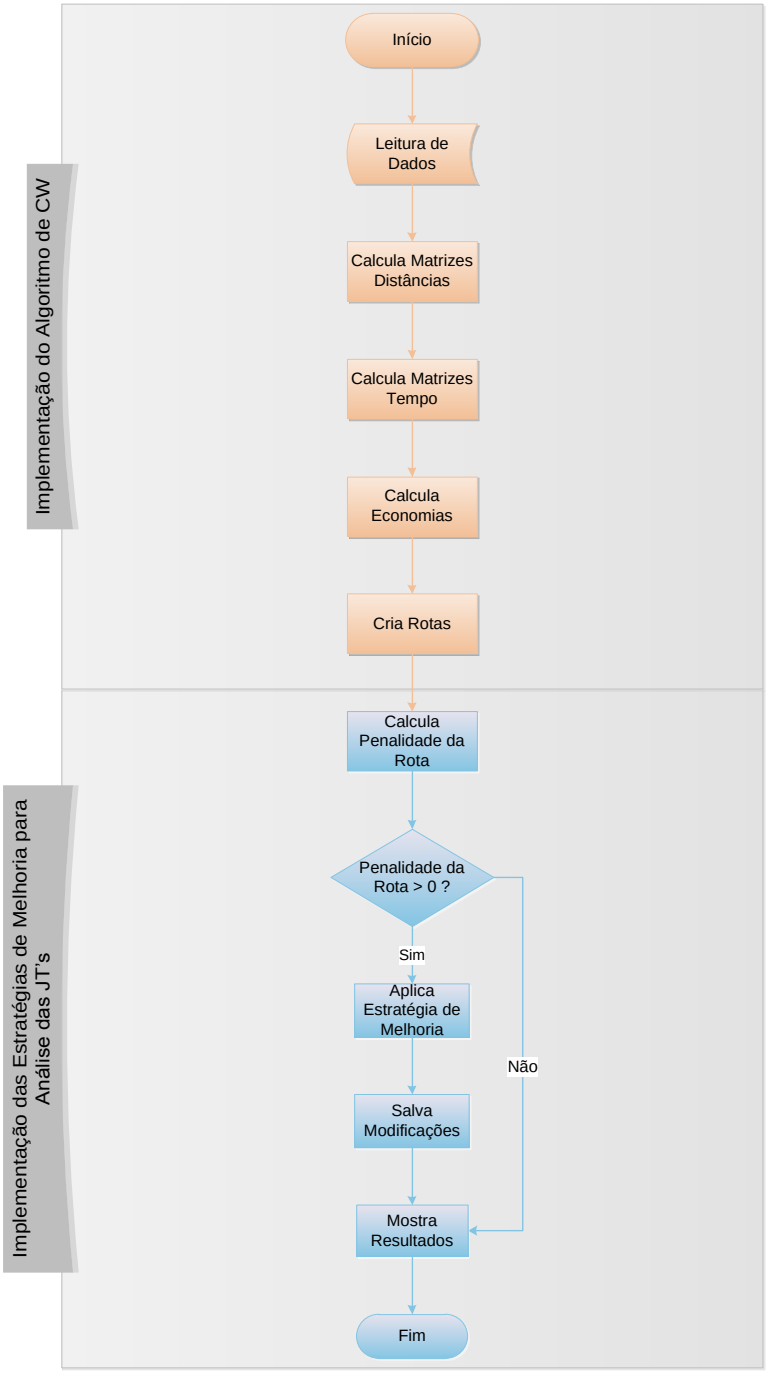


Figura 4: Fluxograma de execução do modelo de roteirização desenvolvido.
Fonte: Produzido pela autora.

Esta divisão em módulos possibilita ao modelo uma maior flexibilidade no que diz respeito ao método escolhido para definição da solução inicial, pois como as estratégias foram desenvolvidas de forma “independente”, caso seja conveniente, um novo método para determinação da solução inicial poderá ser implementado.

O primeiro módulo, indicado pela cor laranja, representa as etapas adotadas para a implementação do método de roteirização em estudo sem nenhuma modificação, e, como pode ser visto no fluxograma, está divido em cinco etapas, que serão detalhados a seguir:

- Leitura de dados: Este procedimento consiste na leitura dos dados de entrada do modelo, traduzindo-se no passo fundamental para que ocorra a roteirização. Os dados lidos correspondem a:
  - ✓ O código relacionado ao ponto;
  - ✓ A coordenada x (longitude);
  - ✓ A coordenada y (latitude);
  - ✓ A quantidade (em unidade de massa) de carga demandada pelo ponto
  - ✓ O horário de início para a locação do serviço;
  - ✓ O horário de fim para a locação do serviço.

  A leitura é feita através da interface com um banco de dados, neste caso, foi usado um arquivo em formato .txt que armazena todas as informações. Cada linha desse arquivo representa um ponto de demanda (ver Figura 5).

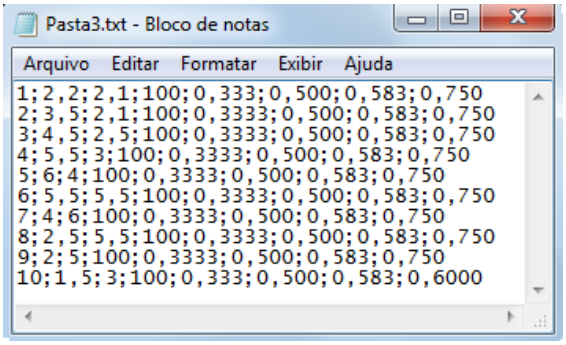


Figura 5: Exemplo de arquivo .txt para leitura dos dados de entrada do modelo.
Fonte: Produzido pela autora.

- Calcula matriz distância: Neste procedimento é gerada a matriz onde estão dispostas as distâncias entre os pontos, bem como, as distâncias entre todos os pontos e o centro de distribuição (CD) ou depósito. O cálculo destas distâncias tem como base as coordenadas x e y dos pontos e do CD.
- Calcula matrizes tempo: Nesta etapa é determinada a matriz que contém os tempos de deslocamento entre os pontos de demanda e entre estes e o CD.

Além disso, também é calculada uma matriz que contém os tempos de parada em cada ponto. Para o cálculo da primeira matriz devem ser consideradas a matriz distância, gerada no procedimento anterior, e a velocidade média do veículo informada pelo usuário. Para a segunda matriz, o tempo de parada (T_p) é constituído por duas parcelas: a primeira é definida como tempo de parada fixo (*a*) e a segunda, como tempo de parada variável (*b*); esta depende da quantidade de carga (*nq*) demandada pelo ponto (ver Equação 4).

$$T_p = a + b \times nq \qquad \text{Equação (4)}$$

- Calcula economias: Neste passo são calculados os ganhos ou economias entre os pontos através da Equação 3, descrita no aporte teórico deste trabalho, gerando assim a matriz dos ganhos.
- Cria rotas: A matriz dos ganhos é finalmente utilizada no último procedimento deste módulo para a geração das rotas. Nesta etapa, ocorre a análise de todas as combinações possíveis entre os pares de pontos. A formação de cada rota se baseia, primeiramente, nos ganhos (dispostos na ordem decrescente), e depois, nas restrições de carregamento máximo do veículo e na jornada de trabalho, ambas informadas pelo usuário. Este procedimento gera, como saída, duas matrizes. A primeira contém a sequência de cada ponto e seus respectivos dados de entrada; a segunda apresenta as seguintes informações: código, carga total e tempo total da rota, além da quantidade de pontos da mesma.

O segundo módulo do código, destacado na cor azul, corresponde ao ciclo para implementação das Estratégias de Melhorias para análise das JTs. Este módulo é composto, basicamente, por cinco procedimentos, que serão explicitados a seguir:

- Calcula penalidade da rota: Este procedimento é dividido em duas etapas. A primeira refere-se ao cálculo da hora de chegada (HC) e da hora de saída (HS), e a segunda corresponde ao cálculo da penalidade de cada ponto. O cálculo da hora de chegada e saída para o primeiro ponto ocorre de forma diferente dos demais, pois neste devem ser considerados a hora de saída do depósito ($HoraSaidaDep$) e o tempo de deslocamento do depósito ao ponto 1 ($\mathrm{TempDeposito}_1$). Como indicado na Equação 5, HCP1 é a hora de chegada no

ponto 1 e HSP1 é a hora de saída no ponto 1, onde T_{p_1} é o tempo de parada no ponto 1.

$$HCP1 = \mathrm{HoraSaidaDep} + \mathrm{TempDeposito}_i \qquad \text{Equação (5)}$$

$$HSP1 = \mathrm{HCP1} + \mathrm{T}_{p_i} \qquad \text{Equação (6)}$$

Para os demais pontos da rota são utilizadas as Equações (7) e (8) para o cálculo da hora de chegada e saída de cada ponto, respectivamente.

$$HC = \mathrm{TempoAcumulado} + \mathrm{TempDesloc}_{i,j} \qquad \text{Equação (7)}$$

$$HS = \mathrm{HC} + \mathrm{T}_{p_j} \qquad \text{Equação (8)}$$

Onde, $\mathrm{TempoAcumulado}$ é tempo gasto nos pontos que antecedem o ponto atual, $\mathrm{TempDesloc}_{i,j}$ é o tempo de deslocamento do ponto *i* (ponto anterior) ao ponto *j* (ponto atual), e T_{p_j} é o tempo de parada no ponto *j*.

A penalidade de cada ponto é determinada através da diferença entre os horários de chegada e saída do veículo e os limites da JT do ponto. Porém, essas diferenças somente são calculadas quando o veículo encontra-se nas situações adiantado em relação ao início da JT do ponto e quando o veículo se encontra atrasado em relação ao final da JT. Por fim, a penalidade de cada rota é calculada somando-se as penalidades dos pontos pertencentes à rota.

Vale ressaltar que estão previstas 15 (quinze) possíveis situações para os casos abordados neste trabalho, já que foram estabelecidas duas JT para cada ponto, sendo uma definida no turno matutino e, a segunda, no vespertino. Estas situações estão ilustradas na Figura 6. As siglas IM, FM, IT e FT significam início manhã, final manhã, início tarde e final tarde, respectivamente.

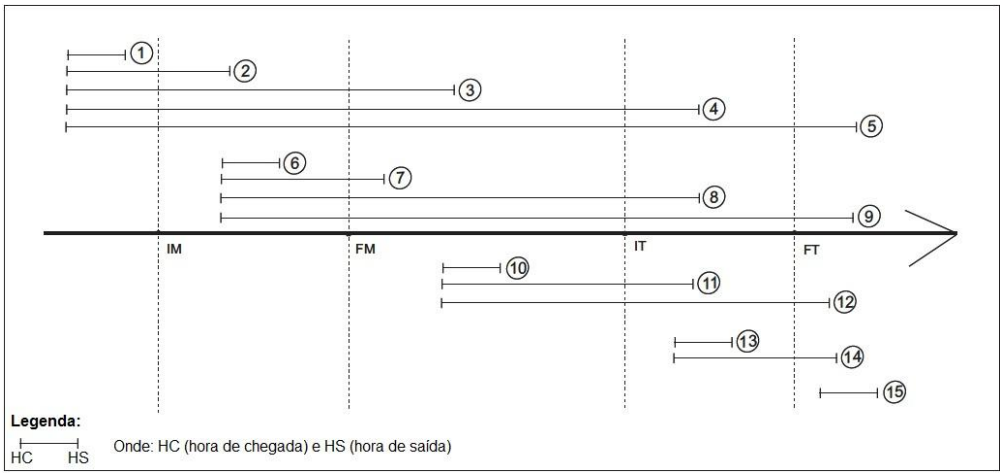


Figura 6: Indicação das Situações Previstas de acordo com as JTs.
Fonte: Produzido pela autora.

É extremamente relevante destacar aqui o tratamento dado ao horário. O software adotado para o desenvolvimento do modelo não entende a formatação padrão de horário, por exemplo, 08:36:17. Por isso, estabeleceu-se que às 00:00:00 será igual a 0 e 24:00:00 será igual a 1. Através de uma regra de três simples define-se, portanto, alguns exemplos de horários dispostos no Quadro 8.

Quadro 8: Exemplos do tratamento dado ao horário.

Intervalo manhã	Intervalo tarde
08:00 = 0,3333	14:00 = 0,5833
10:00 = 0,4167	15:00 = 0,6250
11:00 = 0,4583	16:00 = 0,6667
12:00 = 0,5000	18:00 = 0,7500

Fonte: Produzido pela autora.

- Aplica Estratégia de Melhoria: Após o cálculo da penalidade da rota, caso a mesma seja maior que zero, o algoritmo inicia então a fase de melhoria da solução, onde ele buscará fazer modificações na rota definida com o intuito de minimizar a penalidade da referida rota. Vale relembrar que a solução inicial será sempre a rota definida pelo algoritmo de Clarke e Wright e a fase de melhoria, identificada no fluxograma como “Aplica Estratégias de Melhoria”, utilizará uma e/ou três das estratégias definidas nesse trabalho.

  A seguir estão descritas as estratégias de melhorias desenvolvidas:

a) Estratégia de Melhoria 1: A primeira estratégia de melhoria adotada avalia a possibilidade de cada ponto da rota assumir a posição de ponto inicial, sendo então o ponto que o antecede, o novo ponto final e seguindo a mesma sequência de visitação definida rota original. A cada novo ponto testado são calculados os horários de chegada e as penalidades, avaliando, assim, o impacto da alteração na solução. Dessa forma, se uma rota possui *n* pontos, a presente estratégia testará *n-1* configurações diferentes para esta rota, ou seja, supondo que uma roteirização gerou 10 rotas com penalidades maiores que zero e que cada rota contém 10 pontos, essa estratégia avaliará um total de 90 configurações distintas. A Figura 7 ilustra a primeira iteração para uma rota que possui 5 pontos. Na configuração inicial do CW o veículo iniciou sua rota no ponto 1 e finalizou no ponto 5; a primeira iteração mostra que o veículo iniciou e finalizou sua rota nos pontos 2 e 1, respectivamente; e de forma subsequente, a última iteração foi iniciada no ponto 5 e finalizada no ponto 4.

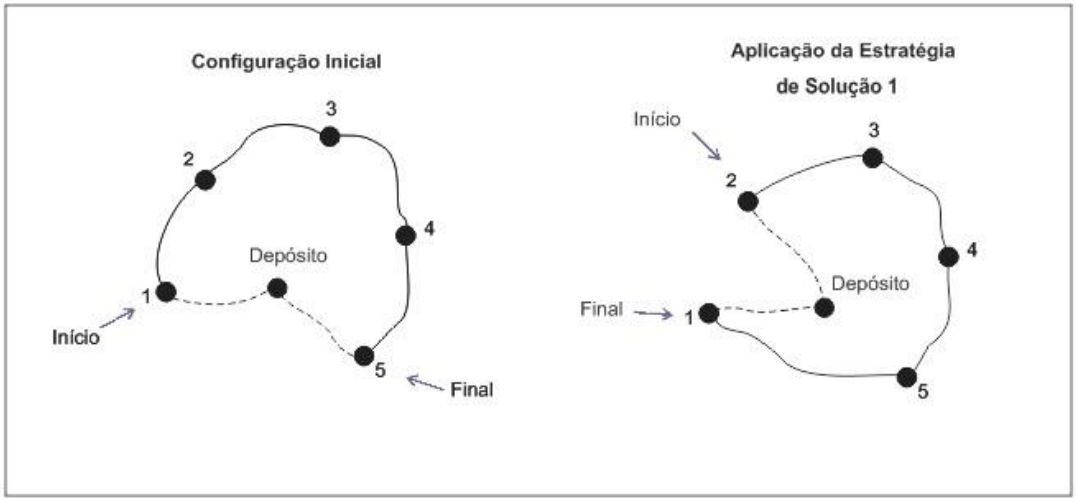


Figura 7: Desenho esquemático da primeira iteração da estratégia de melhoria 1.
Fonte: Produzido pela autora.

b) Estratégia de Melhoria 2: A segunda estratégia de melhoria inverte o sentido de visitação da rota. Na configuração inicial, como mostra a Figura 8, o veículo sai do depósito em direção ao ponto 1 e, ao fim, retorna do ponto 5. Após aplicar esta estratégia, o veículo passa a iniciar sua rota no ponto 5, finalizando as visitas no ponto 1. Caso a inversão proporcione uma menor penalidade para a rota, essa nova configuração passa ser a adotada.

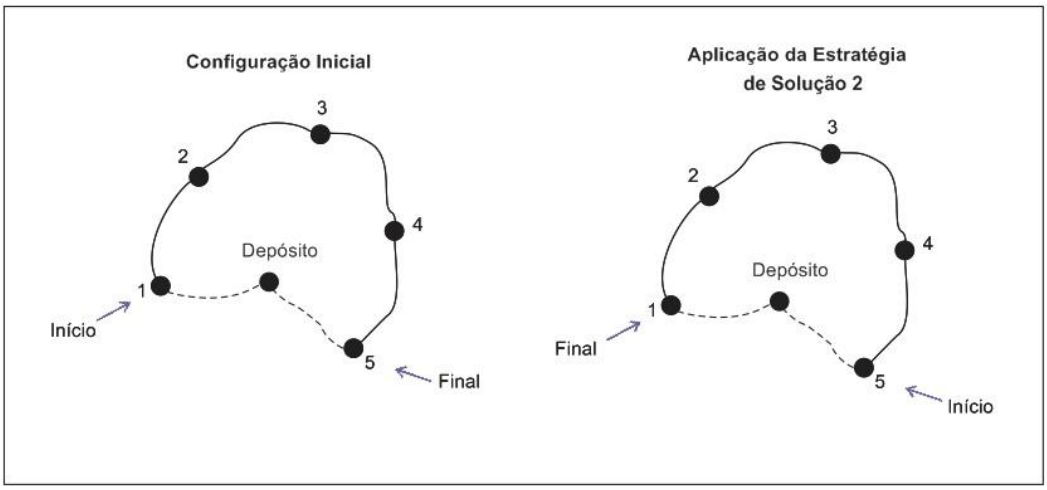


Figura 8: Desenho esquemático da estratégia de melhoria 2 - iteração única.
Fonte: Produzido pela autora.

c) Estratégia de Melhoria 3: Na terceira e última estratégia de melhoria desenvolvida nesse estudo, são permutadas as posições de cada ponto. Para melhor entender o procedimento de execução da referida estratégia, tomemos como base uma rota formada por um conjunto *P* de 5 pontos que são visitados originalmente na sequência a seguir, *P* = {A, B, C, D e E}. Aceitemos também a

nomenclatura C_i e S_i para definirmos a configuração *i* e a sequência *i* do ponto a ser permutado, respectivamente. Se a rota em questão apresenta penalidade maior que zero, então inicia-se o processo de permutação pelo primeiro ponto da rota, neste caso, o ponto A.

De acordo com a Figura 9, na configuração inicial C_1, o ponto mencionado encontra-se na sequencia S_1; dessa forma, na primeira iteração este ponto será permutado com o ponto subsequente a ele, neste caso, o ponto B. Na nova configuração C_2, o ponto B passa a ser o primeiro ponto a ser visitado pelo veículo (S_1) e o ponto A, o segundo (S_2), como pode ser visto na terceira coluna da Figura 8. É importante frisar que os demais pontos não são modificados. Essa troca de posições continuará acontecendo até que o ponto A passe por todas as sequências possíveis. A cada iteração é calculada a nova penalidade da rota e avaliado se a mesma proporcionará um melhor ganho no tocante ao atendimento da JT. Esse processo iterativo será replicado para todos os pontos da rota em questão, finalizando assim a aplicação da estratégia de melhoria 3.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
S_1	A	B	B	B	B
S_2	B	A	C	C	C
S_3	C	C	A	D	D
S_4	D	D	D	A	E
S_5	E	E	E	E	A

Figura 9: Desenho esquemático da estratégia de melhoria 3.
Fonte: Produzido pela autora.

- Salva modificações: Nesta etapa são realizadas as devidas modificações nas sequências do roteiro para o atendimento das JT's. As informações contendo os pontos de demanda, as rotas modificadas e a melhoria alcançada refletida na variável penalidade são arquivadas em uma banco de dados. Neste caso, o modelo desenvolvido possui interface com o Microsoft Access®, que armazena as informações mencionadas a cada vez que o sistema de roteirização é executado.
- Mostra resultados: Ao executar este procedimento as tabelas com os resumos salvos no banco de dados são expostas na tela.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo expõe os resultados obtidos na pesquisa a partir da execução do procedimento metodológico acima descrito, assim como comentários e discussões acerca dos assuntos. Serão feitas algumas aplicações para problemas formulados como PRVJT e, em seguida, apresenta-se as devidas análises para os testes de validação das melhorias propostas neste trabalho.

4.1. Validação do Modelo Desenvolvido

Este subitem irá discorrer sobre as análises feitas para os problemas escolhidos durante o processo de validação do software. Contudo, antes disto, é importante fazer algumas considerações relacionadas à aplicação dos problemas e ao modelo desenvolvido.

Como já mencionado, neste trabalho, foi adotada a variável chamada “penalidade” como parâmetro de análise das JTs. Já que este parâmetro reflete o quão adiantado ou atrasado o veículo está em relação às JTs do ponto, definiu-se como objetivo do modelo minimizar a variável em questão, pois entende-se que quanto menor seu valor, menor também será o tempo em que o veículo encontra-se fora da JT, ou seja, melhor estará sendo a prestação do serviço no tocante ao atendimento da mesma. Dessa forma, o intuito será sempre minimizar a penalidade de cada ponto e, consequentemente, a penalidade total da rota.

Em contrapartida, à medida que as rotas são ajustadas para obrigar o atendimento da restrição à grade de horário, naturalmente, a nova configuração proporcionará uma distância total percorrida igual ou maior do que a configuração sem o atendimento à JT. É importante salientar que analisar estas distâncias não foi objetivo deste estudo.

Outro aspecto a ser destacado é a forma de analisar o desempenho das estratégias de melhorias propostas. Optou-se, neste caso, por estabelecer cenários, nos quais as estratégias foram aplicadas de maneira isolada ou combinadas. Esta abordagem permitiu verificar o comportamento individual e em conjunto das

mesmas. Definiu-se, portanto, 4 (quarto) cenários de análise. No primeiro cenário foi aplicado somente a estratégia de melhoria 1; no segundo, somente a estratégia 2; no terceiro, somente a estratégia 3; e, no quarto e último canário, foram aplicados consecutivamente as estratégias 1, 2 e 3.

Por fim, é importante destacar que todos os problemas aqui apresentados são problemas de laboratório, ou seja, são problemas simulados, mas que buscam refletir casos reais.

4.1.1. Problema com 10 Pontos de Demanda

O problema de roteirização descrito neste item contempla um número reduzido de pontos. Sua aplicação tem como intuito proporcionar uma melhor compreensão do funcionamento do software, demonstrando, assim, a aplicação das estratégias de melhoria. Trata-se de um problema que possui 10 pontos a serem roteirizados com demandas determinísticas e que apresenta também uma frota homogênea com capacidade conhecida e um depósito central com coordenadas identificadas na Tabela 1. Além disso, o problema está sujeito a restrições de horário quanto à jornada de trabalho (8hs/dia) e quanto às JTs para prestação do serviço.

Outras informações como velocidade média do veículo, hora de saída do depósito, tempo fixo e variável de parada em cada ponto e fator de escala adotado são exibidos na Tabela 1. A Tabela 2 mostra todos os pontos com suas respectivas coordenadas X e Y e demanda, além dos dois possíveis horários de início e fim para a locação do serviço. É relevante salientar que as coordenadas e as demandas dos pontos foram obtidas através de um sorteio aleatório com o auxílio do software Microsoft Excel® e que a definição de duas JT para cada nó proporciona ao software desenvolvido uma maior flexibilidade.

Tabela 1: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software.

Velocidade média (km/h)	50
Capacidade do caminhão (kg)	2000
Hora de Saída do Depósito	8hs
Tempo Fixo de Parada	0,4h = 24min
Tempo Variável de Parada	0,001h/kg = 0,06min/kg
Coordenada do depósito	(25;25)
Fator de escala	1,2

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 2: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt).

Código do Ponto	Coord. X	Coord. Y	Demanda	Início Manhã	Final Manhã	Início Tarde	Final Tarde
1	14	30	361	0,333	0,500	0,583	0,750
2	25	45	431	0,333	0,500	0,583	0,750
3	34	32	790	0,333	0,500	0,583	0,750
4	34	10	222	0,333	0,500	0,583	0,750
5	11	46	463	0,333	0,500	0,583	0,750
6	9	47	632	0,333	0,500	0,583	0,750
7	23	39	417	0,333	0,500	0,583	0,750
8	7	34	751	0,333	0,500	0,583	0,750
9	37	43	540	0,333	0,500	0,583	0,750
10	46	20	711	0,333	0,500	0,583	0,750

Fonte: Produzido pela autora.

Os dados apresentados foram carregados no modelo desenvolvido e a solução inicial, baseada no Algoritmo de CW, como já ressaltado, foi gerada. Obteve-se uma solução com 3 rotas como mostra o Gráfico 1. A tabela superior da Figura 10 identifica os pontos com suas respectivas rotas, sequências e penalidades individuais, e a tabela inferior exibe o número de pontos em cada rota, além do peso, do tempo, da penalidade e da distância total de cada roteiro. É possível observar que os pontos identificados pelos códigos 3, 8 e 9, respectivamente das rotas 3, 1 e 2, apresentaram penalidades maiores que zero e iguais a 0,083.

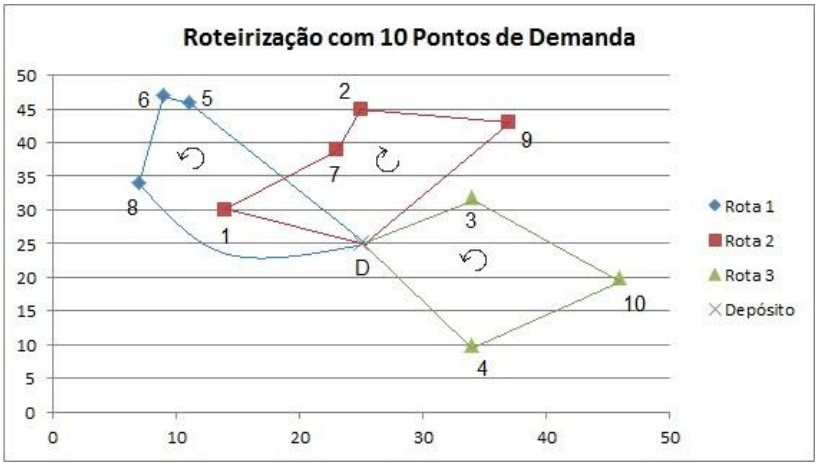


Gráfico 1: Solução inicial (Algoritmo CW) para uma roteirização com 10 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

CodPonto	Rota	Sequencia	Penalidade
5	1	1	0
6	1	2	0
8	1	3	0,083
1	2	1	0
7	2	2	0
2	2	3	0
9	2	4	0,083
4	3	1	0
10	3	2	0
3	3	3	0,083

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	3	4,666	0,083	72,902
2	4	5,081	0,083	77,921
3	3	4,563	0,083	73,782

Figura 10: Solução inicial (Algoritmo de CW) para uma roteirização com 20 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

Após a aplicação da Estratégia de Melhoria 1 (1º cenário), foi possível perceber uma modificação razoável no sequenciamento da rota 1 e uma alteração mais acentuada na rota 2 (ver Gráfico 2). As novas configurações proporcionaram reduções nas penalidades das duas rotas como ilustra a Figura 11. A rota 1 passou a ter penalidade zero, ou seja, todos os pontos estão sendo atendidos nas suas respectivas JT e, consequentemente, como não há espera para o atendimento, o tempo total para executar a rota diminuiu 1,263 h, além disso, a distância total percorrida aumentou 1,753 Km.

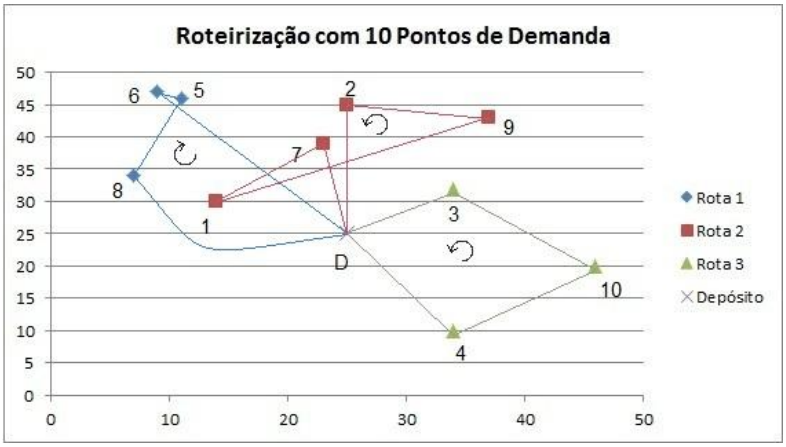


Gráfico 2: Roteirização com 10 pontos de demanda - 1º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

A rota 2 obteve uma penalidade igual a 0,0729, mas em contrapartida apresentou um acréscimo de 1,248 h e 24,625 Km no tempo total e na distância total percorrida, respectivamente. A rota 3, como pode ser vista na Figura 11, não sofreu nenhuma modificação com a aplicação desta estratégia.

CodPonto	Rota	Sequencia	Penalidade
8	1	1	0
5	1	2	0
6	1	3	0
2	2	1	0
9	2	2	0
1	2	3	0
7	2	4	0,07285
4	3	1	0
10	3	2	0
3	3	3	0,083

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	3	3,403	0	74,655
2	4	6,329	0,07285	102,546
3	3	5,85	0,083	73,782

Figura 11: Configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 10 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

No 2º cenário, com a aplicação da Estratégia de Melhoria 2, a configuração inicial manteve-se já que esta estratégia modifica apenas o sentido de visitação (horário ou anti-horário), como já destacado, e não o sequenciamento dos pontos, conforme mostra o Gráfico 3. Entretanto, a alteração do sentido proporcionou uma penalidade nula para as rotas 1 e 3. A rota 2 não apresentou redução no valor de sua penalidade (ver Figura 12).

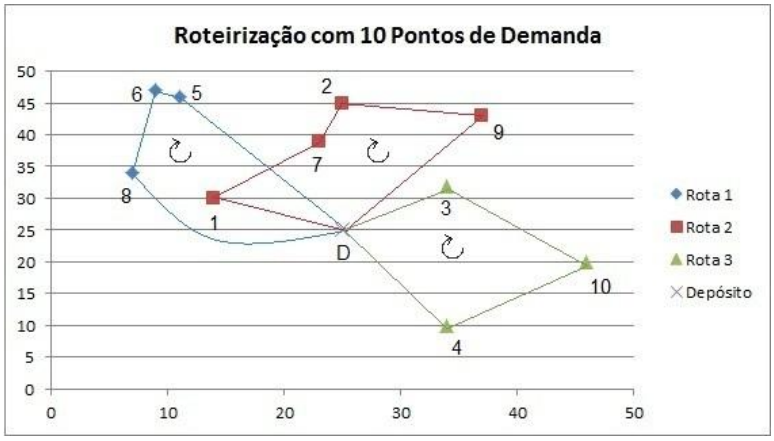


Gráfico 3: Roteirização com 10 pontos de demanda - 2º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodPonto	Rota	Sequencia	Penalidade
8	1	1	0
6	1	2	0
5	1	3	0
1	2	1	0
7	2	2	0
2	2	3	0
9	2	4	0,083
3	3	1	0
10	3	2	0
4	3	3	0

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	3	3,415	0	72,902
2	4	6,09	0,083	77,921
3	3	5,697	0	73,782

Figura 12: Configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 10 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

A aplicação isolada da Estratégia de Melhoria 3, correspondente ao 3º cenário, alcança um resultado melhor do que os obtidos anteriormente no que diz respeito ao valor da penalidade. O Gráfico 4 exibe a nova configuração, entretanto, apenas a rota 2 apresentou de fato um novo sequenciamento. Conforme expõe a Figura 13, as rotas 1 e 3 apresentaram penalidades igual zero e a rota 2, penalidade igual a 0,0745. Esta redução na penalidade não proporcionou um acréscimo nas distâncias percorridas no caso das rotas 1 e 3; diferentemente, na rota 2 o veículo passou a percorrer 17,344 Km a mais quando comparado a situação inicial.

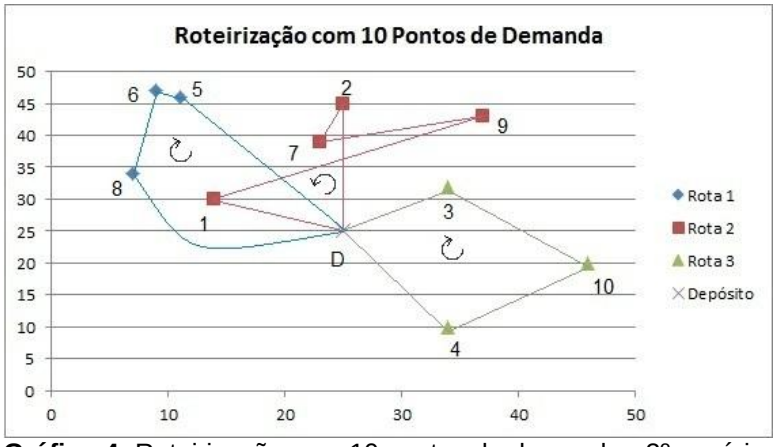


Gráfico 4: Roteirização com 10 pontos de demanda - 3º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodPonto	Rota	Sequencia	Penalidade
8	1	1	0
6	1	2	0
5	1	3	0
2	2	1	0
7	2	2	0
9	2	3	0
1	2	4	0,07453
3	3	1	0
10	3	2	0
4	3	3	0

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	3	3,415	0	72,902
2	4	6,273	0,07453	95,265
3	3	5,85	0	73,782

Figura 13: Configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 10 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

Finalmente, no 4º e último cenário é possível perceber uma configuração bastante similar ao cenário 1, diferindo somente no sentido de visitação da rota 3 (sentido horário), como mostra o Gráfico 5. A Figura 14 aponta que as rotas 1 e 3 apresentaram penalidades iguais a zero e a rota 2, penalidade igual a 0,0729. No tocante às distâncias percorridas, observou-se uma pequena elevação na rota 1 e um aumento mais acentuado na rota 2 com acréscimos de 1,7530 Km e 24,6250 Km, respectivamente; para a rota 3, a distância manteve-se inalterada.

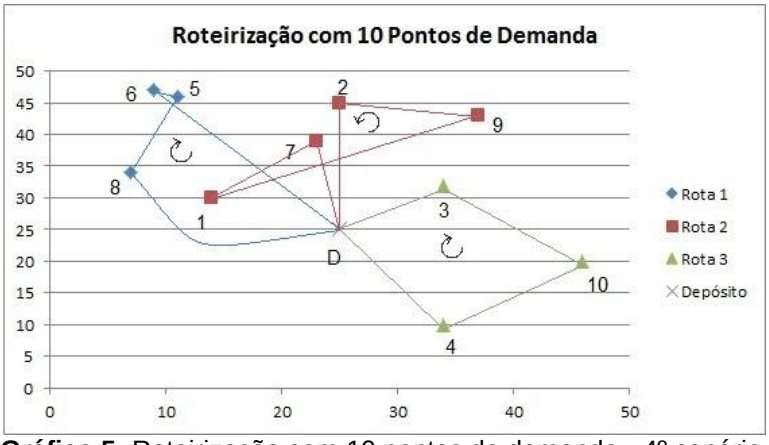


Gráfico 5: Roteirização com 10 pontos de demanda - 4º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodPonto	Rota	Sequencia	Penalidade
8	1	1	0
5	1	2	0
6	1	3	0
2	2	1	0
9	2	2	0
1	2	3	0
7	2	4	0,07285
3	3	1	0
10	3	2	0
4	3	3	0

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	3	3,403	0	74,655
2	4	6,09	0,07285	102,546
3	3	3,705	0	73,782

Figura 14: Configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 10 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

A Tabela 3 apresenta um resumo comparativo dos parâmetros observados em cada cenário.

Tabela 3: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário.

	Parâmetro	Rota 1	Rota 2	Rota 3	Valores Médios	Redução Média (%)
CW	Penalidade	0,0830	0,0830	0,0830	0,0830	-
	Tempo (h)	4,6660	5,0810	4,5630	4,7700	-
	Distância (Km)	72,9020	77,9210	73,7820	74,8683	-
1º Cenário	Penalidade	0,0000	0,0729	0,0830	0,0520	**37,41**
	Tempo (h)	3,4030	6,3290	5,8500	5,1940	-8,89
	Distância (Km)	74,6550	102,5460	73,7820	83,6610	-11,74
2º Cenário	Penalidade	0,0000	0,0830	0,0000	0,0277	**66,67**
	Tempo (h)	3,4150	6,0900	5,6970	5,0673	-6,23
	Distância (Km)	72,9020	77,9210	73,7820	74,8683	0,00
3º Cenário	Penalidade	0,0000	0,0745	0,0000	0,0248	**70,07**
	Tempo (h)	3,4150	6,2730	5,8500	5,1793	-8,58
	Distância (Km)	72,9020	95,2650	73,7820	80,6497	-7,72
4º Cenário	Penalidade	0,0000	0,0729	0,0000	0,0243	**70,74**
	Tempo (h)	3,4030	6,0900	3,7050	4,3993	7,77
	Distância (Km)	74,6550	102,5460	73,7820	83,6610	-11,74

Fonte: Produzido pela autora.

É importante salientar que os valores negativos encontrados na última coluna do quadro mencionado não representam reduções, mas sim aumentos relativos. Em termos de penalidade, podemos destacar que os cenários 3 e 4 alcançaram os melhores resultados, indicando reduções de aproximadamente 70% e 71%, respectivamente. Dentre os referidos cenários, o último destaca-se por proporcionar, além de um melhor atendimento das JTs, uma economia de aproximadamente 8% no tempo total gasto para realizar os roteiros; em detrimento a isto, houve um aumento de 12% na distância total percorrida.

Em um segundo momento de análise para a validação do modelo desenvolvido optou-se pela seguinte estratégia: escolher pontos que já possuíam suas JTs atendidas e modificá-las. O modelo deverá garantir uma nova configuração na qual, apesar das alterações, as JTs sejam atendidas.

Pode-se observar na Figura 10 que as penalidades dos pontos 1, 5 e 10 são nulas, sendo assim, para esses pontos adotaram-se as modificações exibidas na Tabela 4. O ponto 1 não terá mais JT pela manhã, sendo obrigatoriamente o atendido no turno vespertino; e os pontos 5 e 10 passam a estar disponíveis mais tarde.

Tabela 4: Modificações adotadas.

Ponto	Rota	Modificação
1	2	Manhã sem JT
5	1	Início manhã = 0,45
10	3	Início manhã = 0,44

Fonte: Produzido pela autora.

A Figura 15 apresenta os horários de chegada e de saída em cada ponto e sua respectiva penalidade antes da aplicação das estratégias de melhorias. Nesta figura, é possível observar que as modificações realizadas nos horários de atendimento implicaram em penalidades maiores que zero para 6 dos 10 pontos de demanda. Para os pontos 1, 5 e 10, as novas penalidades foram iguais a 0,0914; 0,02376; e 0,0476.

Após aplicar as Estratégias de Melhorias 1, 2 e 3, apenas 2 pontos apresentaram penalidades maiores que zero, como pode ser visto na Figura 16. Ao somar as penalidades dos pontos pertencentes a cada rota obtém-se a penalidade da rota e, consequentemente, é possível calcular a penalidade média. Sendo assim, verificou-se uma redução média no valor da penalidade de aproximadamente 70%, como mostra a Tabela 5. Além disso, percebe-se uma alteração no sequenciamento

dos pontos selecionados, ou seja, o ponto 1, por exemplo, era o primeiro ponto da rota 2 a ser atendido, e após a aplicação das estratégias, o mesmo passou a ser o quarto ponto. Esta modificação proporcionou uma redução da penalidade e, consequentemente, um melhor atendimento das JTs.

Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
5	463	1	1	0,45	0,5	0,583	0,75	0,358572	0,485958	**0,09143**
6	632	1	2	0,333	0,5	0,583	0,75	0,488194	0,614194	**0,083**
8	751	1	3	0,333	0,5	0,583	0,75	0,627347	0,675306	**0**
1	361	2	1	0,583	0,75	0,583	0,75	0,345416	0,614708	**0,2376**
7	417	2	2	0,333	0,5	0,583	0,75	0,627436	0,661478	**0**
2	431	2	3	0,333	0,5	0,583	0,75	0,667802	0,702427	**0**
9	540	2	4	0,333	0,5	0,583	0,75	0,714593	0,75376	**0,00376**
4	222	3	1	0,333	0,5	0,583	0,75	0,350826	0,376743	**0**
10	711	3	2	0,44	0,5	0,583	0,75	0,392363	0,486292	**0,04764**
3	790	3	3	0,333	0,5	0,583	0,75	0,503262	0,632583	**0,07974**

Figura 15: Configuração inicial (CW) obtida após as modificações das JTs.
Fonte: Produzido pela autora.

Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
8	751	1	1	0,333	0,5	0,583	0,75	0,353458	0,401416	**0**
6	632	1	2	0,333	0,5	0,583	0,75	0,414569	0,457569	**0**
5	463	1	3	0,45	0,5	0,583	0,75	0,459805	0,495764	**0**
9	540	2	1	0,333	0,5	0,583	0,75	0,354967	0,394133	**0**
7	417	2	2	0,333	0,5	0,583	0,75	0,408694	0,442735	**0**
2	431	2	3	0,333	0,5	0,583	0,75	0,44906	0,483685	**0**
1	361	2	4	0,583	0,75	0,583	0,75	0,502286	0,614708	**0,08071**
3	790	3	1	0,333	0,5	0,583	0,75	0,344735	0,394318	**0**
4	222	3	2	0,333	0,5	0,583	0,75	0,416318	0,442235	**0**
10	711	3	3	0,44	0,5	0,583	0,75	0,457856	0,587147	**0,083**

Figura 16: Configuração obtida no 4º cenário após as modificações das JTs.
Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 5: Resumo comparativo das penalidades após modificações das JTs.

	Penalidade				
	Rota 1	**Rota 2**	**Rota 3**	**Valor Médio**	**Redução Relativa (%)**
CW	0,1744	0,2413	0,1274	0,1810	-
4º Cenário	0,0000	0,0807	0,0830	0,0546	69,86

Fonte: Produzido pela autora.

4.1.2. Problema com 20 Pontos de Demanda

Este problema considera a roteirização de 20 pontos, os quais apresentam demandas determinísticas, coordenadas *x* e *y* identificadas e as respectivas JT's, uma no período da manhã e outra no período da tarde (ver Tabela 6). É importante ressaltar que todos esses dados foram obtidos através de um sorteio aleatório com o auxílio do Microsoft Excel®.

Os demais dados como velocidade média do veículo, carga máxima a ser transportada, tempos de parada fixo e variável, coordenada do depósito e fator de

escala estão listados na Tabela 7. No mais, a roteirização admite uma jornada de trabalho de 8hs diárias.

Tabela 6: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt).

Código do Ponto	Coord. X	Coord. Y	Demanda (Kg)	Início Manhã	Final Manhã	Início Tarde	Final Tarde
1	15	15	287	0,4167	0,5	0,6667	0,75
2	3	16	307	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
3	6	7	370	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
4	20	1	381	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
5	7	1	184	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
6	11	12	174	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
7	14	1	270	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
8	10	18	235	0,4167	0,5	0,6667	0,75
9	12	7	222	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
10	7	7	266	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
11	1	15	121	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
12	12	5	253	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
13	2	7	337	0,4167	0,5	0,6667	0,75
14	4	20	390	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
15	15	2	281	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
16	13	19	152	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
17	4	5	345	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
18	20	10	179	0,4167	0,5	0,6667	0,75
19	3	0	165	0,4167	0,5	0,6667	0,75
20	20	11	157	0,4167	0,5	0,6667	0,75

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 7: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software.

Velocidade média (km/h)	40
Capacidade do caminhão (kg)	2000
Hora de Saída do Depósito	8hs
Tempo Fixo de Parada	0,3h = 18min
Tempo Variável de Parada	0
Coordenada do depósito	(10;10)
Fator de escala	1,5

Fonte: Produzido pela autora.

Em seguida, o software foi executado e gerou-se uma solução com 3 rotas, a primeira com 7 pontos de entrega; a segunda, com 6 pontos; e a última, novamente com 7 pontos. O Gráfico 6 ilustra as rotas e os sequenciamentos dos pontos, assim como o sentido de visitação (horário ou anti-horário).

As penalidades obtidas nas rotas de código 2, 3 e 5 foram iguais a 0,2309; 0,2791; e 0,2598, respectivamente, como exibe a Figura 17. As distâncias

percorridas foram iguais a 54,96Km; 46,17Km; e 56,77Km para as rotas 2, 3 e 5, respectivamente.

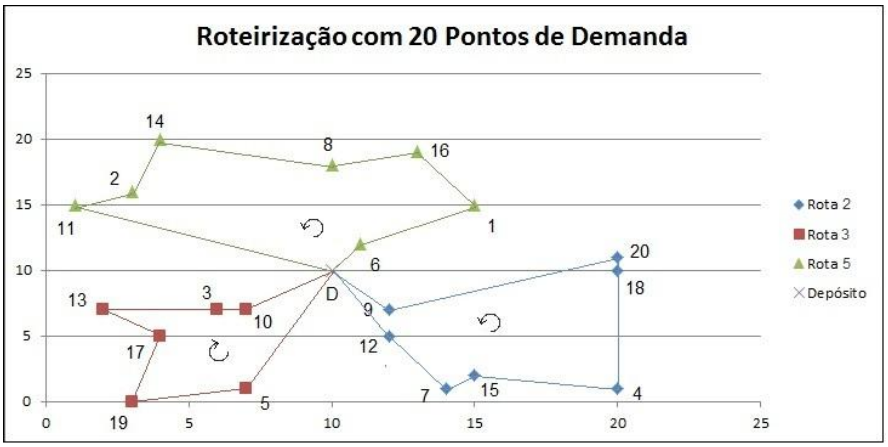


Gráfico 6: Solução inicial (Algoritmo CW) - roteirização com 20 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
2	7	3,474	0,2309	54,961
3	6	2,954	0,2791	46,17
5	7	3,519	0,2598	56,774

Figura 17: Resumo da solução inicial fornecida pelo Algoritmo de CW para uma roteirização com 20 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

Ao observar o primeiro cenário, percebe-se uma ligeira redução no valor das penalidades das rotas 2 e 3 para 0,2032 e 0,2502, respectivamente. As distâncias não apresentaram grandes aumentos; entretanto, ao comparar as Figuras 17 e 18 pode-se notar que os tempos tiveram acréscimos de 4,63h e 5,57h para as rotas destacadas, fazendo com que a jornada de trabalho fosse excedida.

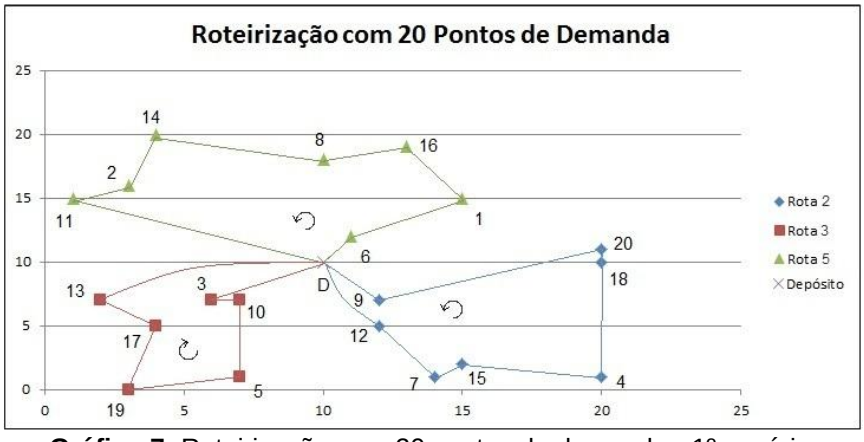


Gráfico 7: Roteirização com 20 pontos de demanda - 1º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

Nesse momento, identificou-se uma das limitações do software. Ao aplicar isoladamente as estratégias 1, 2 e 3, o tempo determinado para a jornada de

trabalho não é respeitado. Dessa forma, a aplicação isolada para este problema torna-se inviável.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
2	7	8,099	0,2032	58,38
3	6	8,519	0,2502	48,891
5	7	3,519	0,2598	56,774

Figura 18: Resumo da configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 20 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

No segundo cenário, as configurações das rotas são exatamente iguais àquelas geradas pelo Algoritmo CW, ou seja, não se alcançou nenhuma melhoria com a aplicação isolada da estratégia 2. Sendo também pertinente o comentário supracitado com relação ao atendimento à jornada de trabalho.

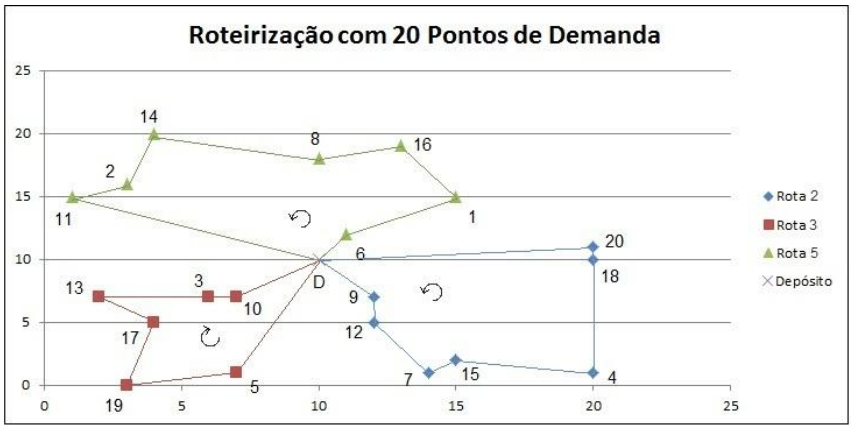


Gráfico 8: Roteirização com 20 pontos de demanda - 2º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
2	7	8,503	0,2309	54,961
3	6	9,139	0,2791	46,17
5	7	3,519	0,2598	56,774

Figura 19: Resumo da configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 20 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

A aplicação da Estratégia de Melhoria 3, terceiro cenário, proporcionou um pequeno decréscimo no valor da penalidade da rota 2 e uma redução mais expressiva no valor da rota 3, como pode ser visto na Figura 20. Esse cenário provocou grandes modificações no sequenciamento das referidas rotas, como consta no Gráfico 9. Contudo, o não atendimento à jornada de trabalho se sobressai em detrimento à redução das penalidades, inviabilizando esta aplicação.

	CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
	2	7	8,567	0,2022	84,734
	3	6	2,706	0	66,255
▶	5	7	3,519	0,2598	56,774

Figura 20: Resumo da configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 20 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

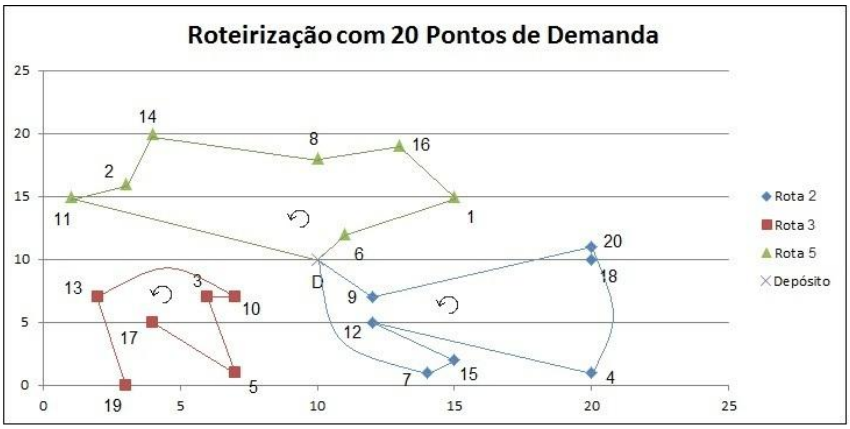


Gráfico 9: Roteirização com 20 pontos de demanda - 3º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

O último cenário deste problema, diferentemente dos cenários anteriores, atendeu ao tempo estabelecido para a jornada de trabalho e apresentou decréscimos mais consideráveis nos valores das penalidades das rotas de código 2 e 3. A penalidade da rota 2 atingiu uma redução de quase 50%, alcançando o valor de 0,118; e a rota 3 obteve uma redução de 100%, zerando o valor de sua penalidade (observar Figura 21). Como nos cenários passados, a rota 5 permaneceu inalterada. O Gráfico 10 esquematiza as novas configurações para as rotas 2 e 3 e confirma a imparcialidade da rota 5 quanto à aplicação desta estratégia.

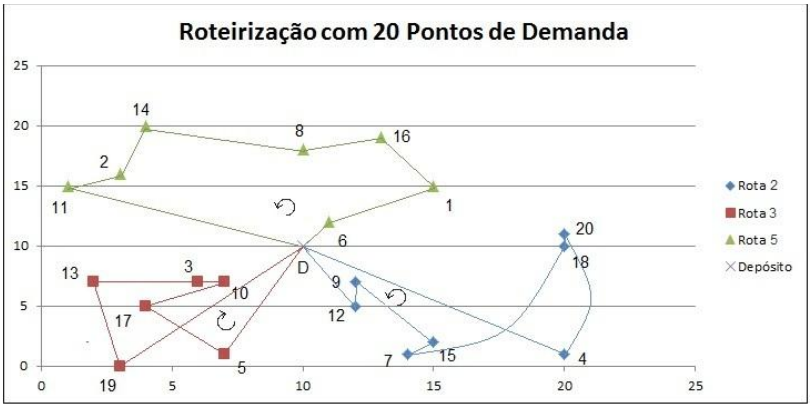


Gráfico 10: Roteirização com 20 pontos de demanda - 4º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
2	7	6,097	0,118	74,85
3	6	2,575	0	63,555
5	7	3,519	0,2598	56,774

Figura 21: Resumo da configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 20 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

Através da Tabela 9 pode-se perceber que, independentemente do não atendimento à jornada de trabalho, as aplicações isoladas das estratégias não apresentaram reduções consideráveis e ainda obtiveram aumentos percentuais significativos no tempo gasto para a realização de cada roteiro. Com relação às distâncias percorridas o acréscimo percentual não foi tão alto.

A aplicação consecutiva das estratégias 1, 2 e 3 possibilitou uma redução média de aproximadamente 51% nos valores das penalidades e, além disso, os aumentos tanto no tempo gasto quanto na distância percorrida foram razoáveis, girando em torno de 23 pontos percentuais.

Tabela 8: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário.

	Parâmetro	Rota 2	Rota 3	Rota 5	Valores Médios	Redução Média (%)
CW	Penalidade	0,2309	0,2791	0,2598	0,2566	-
	Tempo (h)	3,4740	2,9540	3,5190	3,3157	-
	Distância (Km)	54,9610	46,1700	56,7740	52,6350	-
1º Cenário	Penalidade	0,2032	0,2502	0,2598	0,2377	**7,35**
	Tempo (h)	8,0990	8,5190	3,5190	6,7123	-102,44
	Distância (Km)	58,3800	48,8910	56,7740	54,6817	-3,89
2º Cenário	Penalidade	0,2309	0,2791	0,2598	0,2566	**0,00**
	Tempo (h)	8,5030	9,1390	3,5190	7,0537	-112,74
	Distância (Km)	54,9610	46,1700	56,7740	52,6350	0,00
3º Cenário	Penalidade	0,2022	0,0000	0,2598	0,1540	**39,98**
	Tempo (h)	8,5670	2,7060	3,5190	4,9307	-48,71
	Distância (Km)	84,7340	66,2550	56,7740	69,2543	-31,57
4º Cenário	Penalidade	0,1180	0,0000	0,2598	0,1259	**50,92**
	Tempo (h)	6,0970	2,5750	3,5190	4,0637	-22,56
	Distância (Km)	74,8500	63,5550	56,7740	65,0597	-23,61

Fonte: Produzido pela autora.

Em um segundo momento de análise, no qual é realizada uma observação mais específica para a validação das estratégias, toma-se como ponto de partida a rota de código 2. Como se pode perceber na Figura 22, o ponto 12 é o segundo ponto a ser visitado e apresenta penalidade nula.

	Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
	9	222	2	1	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,338967	0,351467	0
▶	12	253	2	2	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,354592	0,367092	0
	7	270	2	3	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,37408	0,38658	0
	15	281	2	4	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,388789	0,401289	0
	4	381	2	5	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667	0,409257	0,588357	0,1666
	18	179	2	6	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,602419	0,6792	0,06428
	20	157	2	7	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,680763	0,693263	0

Figura 22: Detalhes da rota 2 antes de inserir a modificação.
Fonte: Produzido pela autora.

Considera-se agora que o ponto 12 passa a admitir, nos seus dados de entrada, a modificação disposta na Tabela 9:

Tabela 9: Modificação adotada.

Ponto	Rota	Modificação
12	2	Intervalo manhã: 0,4167 até 0,5

Fonte: Produzido pela autora.

Como pode ser visto na Figura 23, a modificação foi inserida e, como consequência, o ponto passou a apresentar uma penalidade igual 0,0621. Após a aplicação das Estratégias de Melhoria - definindo, portanto, o 4º cenário – a configuração da rota foi reorganizada de tal forma que o ponto 12 tornou-se o sexto ponto a ser visitado, apresentando penalidade zero. Além disso, ao realizar uma comparação entre o valor da penalidade da rota em questão antes e depois da aplicação das estratégias, percebe-se uma redução de 68% (ver Tabela 10).

	Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
	9	222	2	1	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,338967	0,351467	0
▶	12	253	2	2	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,354592	0,4292	0,06211
	7	270	2	3	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,436188	0,6792	0,2305
	15	281	2	4	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,68141	0,69391	0
	4	381	2	5	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667	0,701877	0,714377	0,04768
	18	179	2	6	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,728439	0,740939	0
	20	157	2	7	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,742502	0,755002	0,005002

Figura 23: Detalhes da rota 2 depois de inserir a modificação e antes da aplicação das estratégias.
Fonte: Produzido pela autora.

	Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
	9	222	2	1	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,338967	0,351467	0
	15	281	2	2	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,360578	0,373078	0
	7	270	2	3	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,375288	0,387788	0
	18	179	2	4	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,404689	0,4292	0,01201
	20	157	2	5	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,430763	0,443263	0
▶	12	253	2	6	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,458888	0,471388	0
	4	381	2	7	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667	0,485363	0,5958	0,09794

Figura 24: Detalhes da rota 2 depois de inserir a modificação e depois da aplicação das estratégias.
Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 10: Resumo comparativo das penalidades após modificação da JT.

	Penalidade	
	Rota 2	Redução Relativa (%)
CW	0,3453	-
4º Cenário	0,1099	68,17

Fonte: Produzido pela autora.

O Gráfico 11 esquematiza a nova configuração para a rota 2 após a aplicação das estratégias.

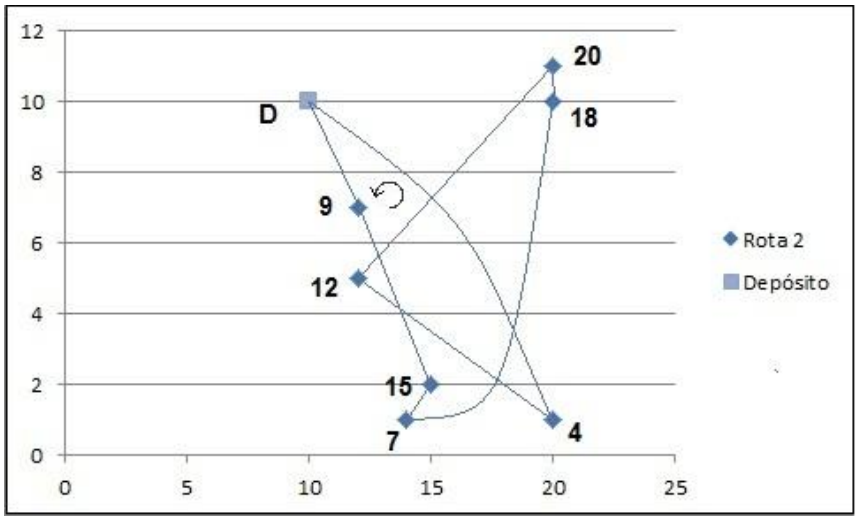


Gráfico 11: Configuração da rota 2 após modificação.
Fonte: Produzido pela autora.

4.1.3. Problema com 40 Pontos de Demanda

O último problema adotado nesse processo de validação aborda 40 pontos de demanda, os quais possuem suas coordenadas *x* e *y*, sua quantidade de produtos demandada e suas JTs listadas na Tabela 12. Assim como no problema apresentado anteriormente, todos os dados citados acima foram obtidos por meio de um sorteio aleatório utilizando o software do Microsoft Excel®.

Outros dados necessários à roteirização como velocidade média do veículo, carga máxima a ser transportada, tempos de parada fixo e variável, coordenada do depósito e fator de escala são informados na Tabela 11. Igualmente aos demais problemas abordados, este admite uma jornada de trabalho de 8hs diárias.

Tabela 11: Dados de entrada informados pelo usuário através da interface do software.

Velocidade média (km/h)	40
Capacidade do caminhão (kg)	2000
Hora de Saída do Depósito	8hs
Tempo Fixo de Parada	0,3h = 18min
Tempo Variável de Parada	0
Coordenada do depósito	(10;10)
Fator de escala	1,5

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 12: Dados de entrada informados pelo usuário através do arquivo (.txt).

Código do Ponto	Coord. X	Coord. Y	Demanda (Kg)	Início Manhã	Final Manhã	Início Tarde	Final Tarde
1	10	2	230	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
2	16	1	224	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
3	0	3	341	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
4	0	4	231	0,4167	0,5	0,6667	0,75
5	8	1	200	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
6	9	9	465	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
7	20	4	447	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
8	17	19	398	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
9	0	14	349	0,4167	0,5	0,6667	0,75
10	7	10	382	0,4167	0,5	0,6667	0,75
11	0	7	459	0,4167	0,5	0,6667	0,75
12	19	9	427	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
13	9	11	364	0,4167	0,5	0,6667	0,75
14	0	18	451	0,4167	0,5	0,6667	0,75
15	13	9	244	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
16	3	12	331	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
17	0	0	327	0,4167	0,5	0,6667	0,75
18	16	17	478	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
19	2	18	202	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
20	7	16	237	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
21	15	0	315	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
22	18	0	267	0,4167	0,5	0,6667	0,75
23	2	3	379	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
24	16	18	347	0,4167	0,5	0,6667	0,75
25	15	6	462	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
26	5	0	494	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667
27	5	8	379	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
28	13	13	222	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
29	1	12	286	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
30	4	1	476	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
31	19	16	218	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
32	18	5	486	0,4167	0,5	0,6667	0,75
33	8	19	489	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
34	3	13	292	0,4167	0,5	0,5833	0,6667
35	19	0	202	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
36	9	5	445	0,4167	0,5	0,6667	0,75
37	11	9	383	0,3333	0,4167	0,6667	0,75
38	2	13	464	0,4167	0,5	0,6667	0,75
39	12	6	205	0,4167	0,5	0,6667	0,75
40	17	5	225	0,4167	0,5	0,5833	0,6667

Fonte: Produzido pela autora.

A solução inicial fornecida pelo software apresentou um resultado contendo 6 roteiros, os mesmos foram identificados pelos códigos 1, 2, 4, 5, 6 e 7 e contém cada um deles, respectivamente, 8, 7, 6, 7, 6 e 6 pontos a serem visitados (ver Gráfico 12). Como tratam-se de muitas rotas, suas penalidades, tempos gastos e distâncias percorridas não serão descritas neste texto, cabendo, portanto, apenas análises pontuais.

Ao observar a Figura 25, pode-se perceber que a rota 1 obtive a maior penalidade, com um valor de 0,4408, e a rota 4 a menor, com um valor de 0,0153. No geral, a roteirização apresentou um tempo médio de 3hs para executar cada rota, percorrendo, em média, 43Km.

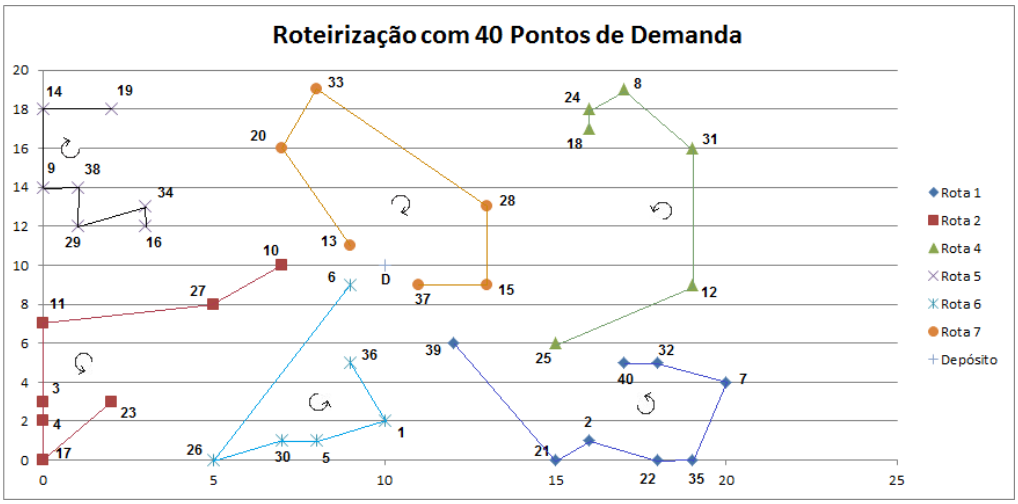


Gráfico 12: Solução inicial (Algoritmo CW) para uma roteirização com 40 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

	CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
▶	1	8	3,46	0,4408	47,688
	2	7	3,172	0,2612	48,244
	4	6	2,921	0,0153	50,463
	5	7	3,128	0,2938	46,244
	6	6	2,633	0,25	37,494
	7	6	2,64	0,3017	37,779

Figura 25: Resumo da solução inicial fornecida pelo Algoritmo de CW para uma roteirização com 40 pontos de demanda.
Fonte: Produzido pela autora.

No 1º cenário estabelecido, as rotas 1, 2, 5 e 6 apresentaram mudanças no sequenciamento (ver Gráfico 13) e no valor de sua penalidade (observar Figura 26). O roteiro 1 foi aquele que alcançou a maior redução de penalidade, cerca de 52%; os próximos 4 roteiros obtiveram reduções razoáveis e o último permaneceu inalterado, como pode ser percebido tanto pelo gráfico como pela figura.

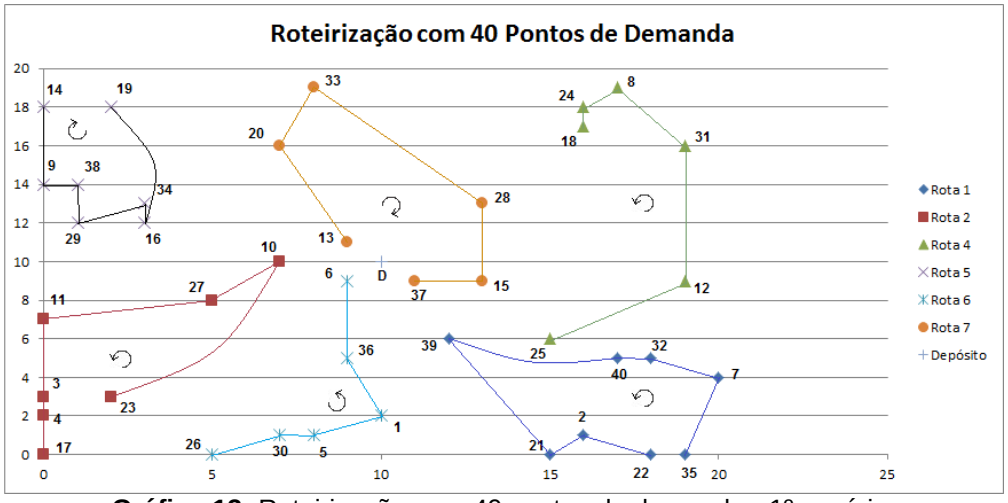


Gráfico 13: Roteirização com 40 pontos de demanda - 1º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

	CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
▶	1	8	8,227	0,2111	73,614
	2	7	8,313	0,2262	72,453
	4	6	2,768	0,0153	50,463
	5	7	9,057	0,2672	60,658
	6	6	5,927	0,1544	37,843
	7	6	2,64	0,3017	37,779

Figura 26: Resumo da configuração obtida no 1º cenário – roteirização com 40 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

Após a aplicação da Estratégia de Melhoria 2, segundo cenário, apenas as rotas 1 e 5 sofreram pequenas alterações na configuração, como esquematiza o Gráfico 14. Comparando-se as Figuras 25 e 27, percebe-se que a primeira rota mencionada reduziu 25% o valor de sua penalidade e apresentou um aumento de 4,67hs no tempo gasto, mantendo a distância percorrida constante. Já para a segunda rota, a redução foi tão inexpressiva (3%) que poderia ser desconsiderada.

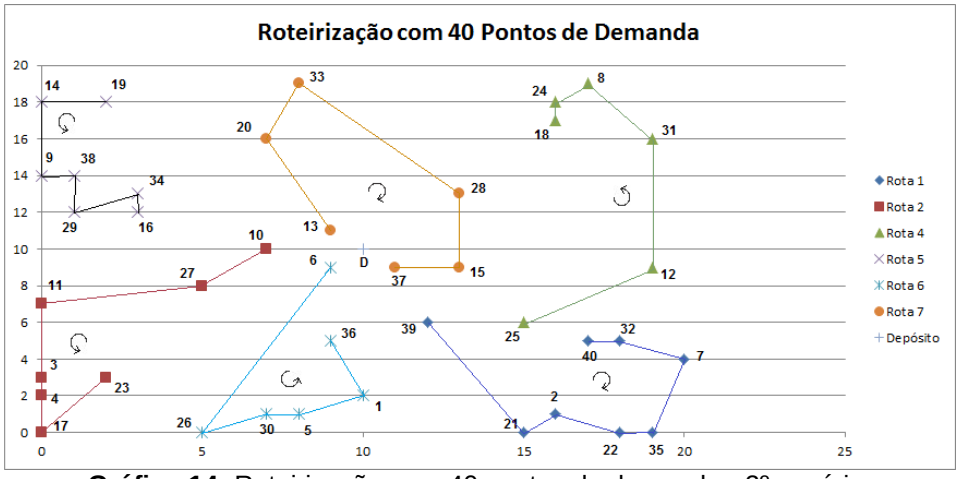


Gráfico 14: Roteirização com 40 pontos de demanda - 2º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

Entretanto, assim como no problema anterior, percebeu-se também que, para aplicação isolada das estratégias, a jornada diária de trabalho não foi respeitada. Sendo este um requisito importante no processo de roteirização, torna-se inviável a consideração deste cenário, a menos que seja admitida a utilização de horas extras para o tempo excedido.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	8	9,593	0,3302	47,688
2	7	8,988	0,2612	48,244
4	6	2,768	0,0153	50,463
5	7	8,632	0,2833	46,244
6	6	8,416	0,25	37,494
7	6	2,64	0,3017	37,779

Figura 27: Resumo da configuração obtida no 2º cenário – roteirização com 40 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

No 3º cenário, a aplicação da estratégia resultou em uma configuração com grandes alterações, como demonstrado no Gráfico 15. Comparando-se as Figuras 25 e 28 e realizando-se pequenos cálculos, notou-se que as reduções obtidas no valor da penalidade foram, em pontos percentuais, iguais a 73, 27, 100, 23 e 34, aproximadamente. As reduções mencionadas referem-se às rotas 1, 2, 4, 5 e 6, nessa mesma sequência. A rota 7 não apresentou nenhuma alteração

Apesar disso, é feita também a ressalva para o não atendimento à jornada de trabalho no caso específico da rota 5 como mostra a Figura 28, inviabilizando a aplicação desse cenário.

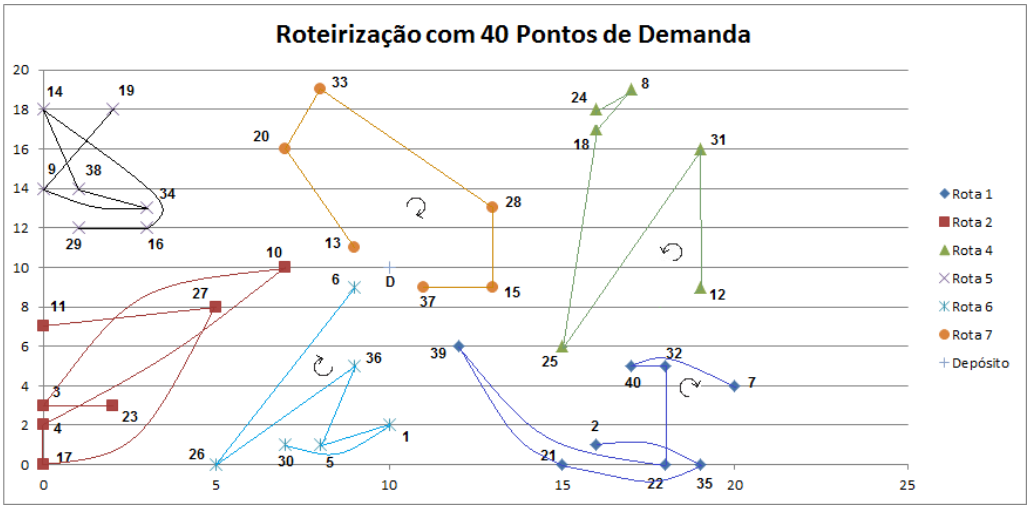


Gráfico 15: Roteirização com 40 pontos de demanda - 3º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	8	6,251	0,1167	80,994
2	7	7,946	0,1893	90,199
4	6	2,882	0	77,282
5	7	8,29	0,2264	64,852
6	6	6,611	0,1647	55,011
7	6	2,64	0,3017	37,779

Figura 28: Resumo da configuração obtida no 3º cenário – roteirização com 40 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

Para o 4º cenário, as novas configurações obtidas estão apresentadas no Gráfico 16. As rotas 1, 2, 4, 5 e 6 sofreram modificações no sequenciamento dos pontos e apresentaram reduções percentuais no valor da penalidade iguais a, aproximadamente, 58%, 29%, 100%, 29% e 39%, respectivamente. Como consequência dos decréscimos, os tempos gastos e as distâncias aumentaram expressivamente, como pode ser visto da Figura 29.

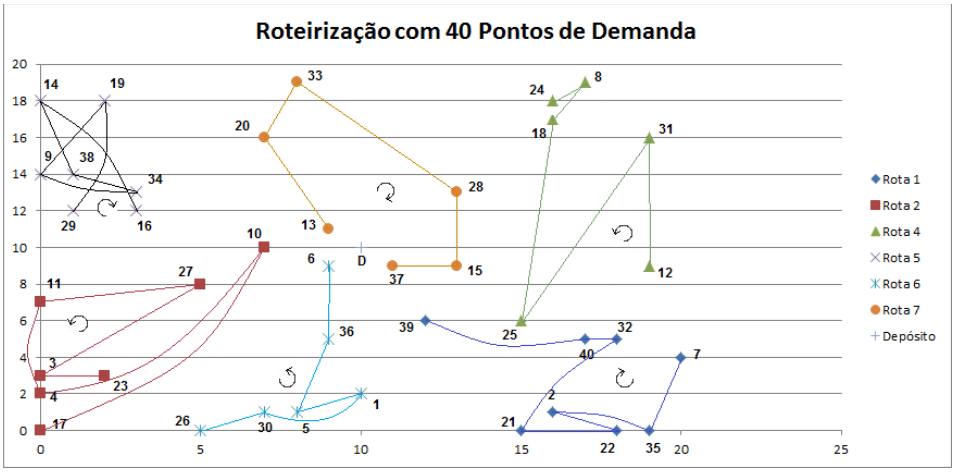


Gráfico 16: Roteirização com 40 pontos de demanda - 4º cenário.
Fonte: Produzido pela autora.

CodRota	NumPontos	TempoTotal	Penalidade	Distancia
1	8	7,628	0,1831	61,685
2	7	7,946	0,1853	100,168
4	6	2,882	0	77,282
5	7	7,993	0,2084	64,926
6	6	5,927	0,1501	42,528
7	6	2,64	0,3017	37,779

Figura 29: Resumo da configuração obtida no 4º cenário – roteirização com 40 pontos.
Fonte: Produzido pela autora.

A Tabela 13 apresenta os valores médios para a penalidade, o tempo gasto e a distância percorrida em cada cenário simulado, assim como seus respectivos percentuais de redução. Analisando as seis rotas, em termos de penalidade, o 3º cenário apresentou o melhor resultado, com aproximadamente 36%. Muito embora, o tempo excedido na rota 5 (ver Figura 28) do cenário mencionado tenha sido pequeno (0,29h =0,17min) não é admitido tal situação. Em função disso, o 4º cenário apresenta-se como o melhor resultado, com uma redução média no valor da penalidade de 34%. Com relação ao tempo gasto e a distância percorrida no 4º cenário, os aumentos foram de 95% e 49%, respectivamente.

Tabela 13: Resumo dos parâmetros observados em cada cenário.

	Parâmetro	Valores Médios	Redução Média (%)
CW	Penalidade	0,26	-
	Tempo (h)	2,99	-
	Distância (Km)	42,99	-
1º Cenário	Penalidade	0,20	**24,76**
	Tempo (h)	6,16	-105,70
	Distância (Km)	55,47	-29,04
2º Cenário	Penalidade	0,24	**7,75**
	Tempo (h)	6,84	-128,57
	Distância (Km)	44,65	-3,88
3º Cenário	Penalidade	0,17	**36,09**
	Tempo (h)	5,77	-92,83
	Distância (Km)	67,69	-57,46
4º Cenário	Penalidade	0,17	**34,18**
	Tempo (h)	5,84	-95,03
	Distância (Km)	64,06	-49,03

Fonte: Produzido pela autora.

Após a análise geral feita, as próximas observações serão baseadas na rota de código 4. É possível notar na Figura 30 que o ponto 25 da referida rota apresenta penalidade com valor nulo e, além disso, é o primeiro ponto a ser visitado. Para este ponto será, a partir de agora, adotada a modificação especificada na Tabela 14, com o intuito de mudar o valor de sua penalidade.

Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
25	462	4	1	0,3333	0,4167	0,5833	0,6667	0,342227	0,354727	0
12	427	4	2	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,361671	0,374171	0
31	218	4	3	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,383893	0,396393	0
8	398	4	4	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,401401	0,4292	0,0153
24	347	4	5	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,431164	0,443664	0
18	478	4	6	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,445053	0,457553	0

Figura 30: Detalhes da rota 4 antes de inserir a modificação.
Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 14: Modificação adotada.

Ponto	Rota	Modificação
25	4	Intervalo manhã: 0,4167 até 0,5

Fonte: Produzido pela autora.

Após inserir a modificação e novamente executar o software, pode-se perceber na Figura 31 que o veículo chega ao ponto 25 antes da JT especificada estar disponível, por isso, passa a apresentar uma penalidade igual 0,07447. Além disso, identificamos 4 dos 6 pontos da rota com penalidades diferente de zero.

Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
25	462	4	1	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,342227	0,4292	**0,07447**
12	427	4	2	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,436144	0,6792	**0,2306**
31	218	4	3	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,688922	0,701422	**0**
8	398	4	4	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,70643	0,71893	**0,05223**
24	347	4	5	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,720894	0,733394	**0**
18	478	4	6	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,734783	0,747283	**0,08058**

Figura 31: Detalhes da rota 4 depois de inserir a modificação e antes da aplicação das estratégias.
Fonte: Produzido pela autora.

Aplicando-se as Estratégias de Melhorias 1, 2 e 3, o ponto 25 deixou de ser o primeiro e passou a ser o último ponto a ser visitado, ou seja, o horário de chegada foi alterado para que sua JT fosse atendida. Outra observação pertinente é que apenas 1 dos 6 pontos apresentaram penalidade maior que zero (ver Figura 32).

Ponto	Peso	Rota	Sequencia	InicioManha	FinalManha	InicioTarde	FinalTarde	HoraChegada	HoraSaida	Penalidade
31	218	4	1	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,348356	0,360856	**0**
12	427	4	2	0,3333	0,4167	0,6667	0,75	0,370579	0,383079	**0**
18	478	4	3	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,394945	0,4292	**0,02175**
8	398	4	4	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,432306	0,444806	**0**
24	347	4	5	0,4167	0,5	0,6667	0,75	0,44677	0,45927	**0**
25	462	4	6	0,4167	0,5	0,5833	0,6667	0,475994	0,488494	**0**

Figura 32: Detalhes da rota 4 depois de inserir a modificação e depois da aplicação das estratégias.
Fonte: Produzido pela autora.

A Tabela 15 expõe uma comparação entre as penalidades da rota 4 antes e depois da aplicação das estratégias. As modificações registradas na Figura 32 proporcionaram uma redução de aproximadamente 95% na penalidade da rota mencionada. Esta demonstração comprova que o software busca através da aplicação das estratégias desenvolvidas uma reordenação dos pontos com o intuito de apresentar uma sequência de visitação favorável ao atendimento das JTs.

Tabela 15: Resumo comparativo das penalidades após modificação da JT.

	Penalidade	
	Rota 4	**Redução Relativa (%)**
CW	0,4378	-
4º Cenário	0,0218	95,02

Fonte: Produzido pela autora.

O Gráfico17 representa mais claramente, a nova configuração resultante da modificação adotada.

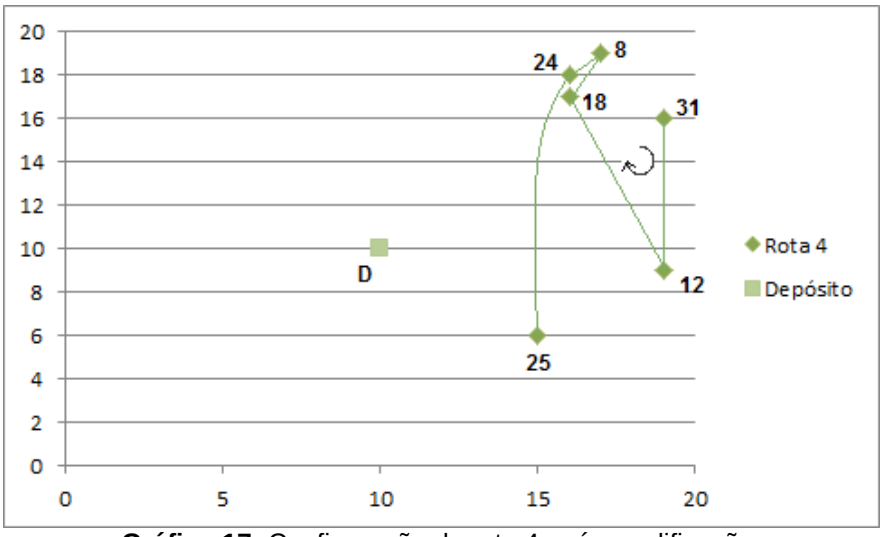


Gráfico 17: Configuração da rota 4 após modificação.
Fonte: Produzido pela autora.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo irá discorrer sobre os resultados obtidos com o desenvolvimento do presente trabalho e nele serão apresentadas também recomendações para futuros estudos, os quais visam melhorar os resultados obtidos até então.

5.1. Conclusões

As novas necessidades e exigências dos consumidores norteiam as empresas e indicam em quais aspectos as mesmas devem evoluir, ou seja, são os desejos dos clientes aliados à competitividade que direcionam, em parte, a evolução do mercado. Com o intuito de atender a essas exigências, as corporações buscam a cada dia melhorar seus processos e, consequentemente, agregar valor ao nível de serviço prestado.

O sistema logístico de uma empresa é um dos processos que vem ganhando destaque nos últimos tempos e, por isso, um dos seus pilares – o planejamento – passou a disfrutar de expressiva notoriedade dentro das empresas. Pautada nessa importância, a roteirização de veículos apresenta-se como uma excelente ferramenta de apoio ao planejamento para a determinação de roteiros de entrega e/ou coleta de produtos. Entretanto, a roteirização é um problema que pode ser influenciado por uma série de fatores, dentre eles estão as JTs.

Este trabalho buscou tratar especificamente de uma linha de pesquisa bastante explorada na literatura que são os problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo. Facilmente, identifica-se uma aplicação para esse tipo problema, seja em empresas especializadas em operações logísticas ou em pequenas empresas que fornecem o serviço de pronta entrega, também chamado de *delivery*.

O objetivo central do trabalho foi propor um algoritmo que, baseando-se na solução inicial fornecida pelo Método de Clarke e Wright, admitisse a JT como restrição do modelo. Nessa linha de raciocínio foi desenvolvido um software que se apoiou tanto no método proposto como nas chamadas Estratégias de Melhorias, as

quais possibilitaram analisar e manipular os sequenciamentos das rotas com o intuito de atender aos intervalos de tempo estabelecidos pelos clientes.

De acordo com os resultados obtidos e apresentados no capítulo anterior, a metodologia definida para análise permitiu identificar que o cenário 4 apresentou a maior redução no valor da penalidade, parâmetro foco do estudo. Muito embora o cenário 3 tenha também apresentado decréscimos significativos, sua aplicação provocou, para algumas rotas, o não atendimento da restrição de tempo ligada a jornada de trabalho. Em função disso, foi considerado inviável em 2 dos 3 problemas trabalhados. Tendo em vista que, o cenário 3 representa a aplicação da Estratégia de Melhoria 3 e o cenário 4, a aplicação consecutiva das três estratégias, podemos intuir que grande parcela do bom desempenho do cenário 4 deve-se à estratégia 3. Dessa forma, tem-se que a lógica adotada na terceira estratégia foi a mais bem aceita pelos problemas abordados neste estudo.

Com relação aos cenários 1 e 2, as aplicações isoladas não apresentaram resultados satisfatório e, por isso, não serão consideradas válidas. Somente a aplicação consecutiva proporcionou resultados consistentes, principalmente quando analisados de forma pontual, sendo, portanto, considerada válida a metodologia adotada neste trabalho de monografia para o atendimento das JTs dos clientes.

No tocante aos tempos gastos para executar os roteiros, percebeu-se em grande parte dos cenários um aumento considerável e em outros, uma redução singular. Se, por um lado, o decréscimo da penalidade indica que o veículo está operando com menos ociosidade, então o tempo diminui, o que é extremamente positivo para o software; entretanto, por outro lado, a redução na penalidade pode provocar um aumento na distância percorrida e, consequentemente, no tempo gasto. Este aumento no tempo é, para o segundo caso, inevitável e deverá ser arcado pelo software em função do objetivo maior que é o atendimento das JTs.

Conforme esperado, as distâncias percorridas após a aplicação das estratégias foram iguais ou superiores àquelas obtidas na solução inicial. Apesar disto ser um fator negativo, esse tipo de problema prioriza as JTs em detrimento das distâncias. Contudo, assim como o tempo gasto, este não foi um aspecto analisando no decorrer da implementação computacional do programa, sendo apenas observado durante a construção dos resultados.

Por fim, cabe alertar que, apesar dos resultados obtidos com a implementação do modelo de roteirização, existem alguns fatores que limitam as soluções fornecidas pelo mesmo. Um destes está relacionado à pouca quantidade de testes de validação realizados no trabalho, contemplando casos específicos que, muitas vezes, não englobam a complexidade das situações reais.

Além disto, existem outras variáveis importantes a serem consideradas em um problema de roteirização, como as prioridades na distribuição e as restrições de trânsito nas vias, por exemplo. Assim, diante dos fatores apresentados, destaca-se a importância de novas implementações, que visem agregar restrições e variáveis pertinentes para otimização da solução deste tipo de problema.

5.2. Recomendações

O modelo desenvolvido neste trabalho mostrou-se de extrema relevância para a abordagem do problema específico aqui tratado. Contudo, é fato que esta discussão, envolvendo melhorias nos métodos de roteirização, é muito mais abrangente, e permite uma infinidade de novas implementações nos algoritmos de solução.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do modelo desenvolvido em um estudo de caso no setor logístico de uma empresa, com o intuito de analisar o desempenho do software em um caso prático real. Além disso, uma grande contribuição seria desenvolver e testar novas estratégias de melhorias que apresentem um desempenho similar a estratégia 3, podendo mesclar no modelo aquelas que proporcionarem os melhores resultados.

Outra possibilidade de melhoria do programa é montar uma interface com um software, por exemplo, um Sistema Informação Geográfica, que permita a criação de roteiros sobre mapas geográficos de uma cidade ou região, admitindo, assim, que as configurações das rotas sejam geradas paralelas à obtenção do resultado. Essa implementação contribuiria significativamente para a avaliação das soluções obtidas.

REFERÊNCIAS

ABEPRO - ASSOCIAÇÃO RASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção**, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>. Acesso em: set. 2011.

ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. **Logística Aplicada:** suprimento e distribuição física. 3 ed. São Paulo: E. Blucher, 2000.

ANDRADE, M. M. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

ARAÚJO, C. E. G. **Algoritmos Genéticos Híbridos sem Delimitadores de Rotas para Problemas de Roteirização de Veículos**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial:** transportes, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993.

_____. **Business Logistics Management:** Planning, Organizing and Controlling the Supply Chain. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1999, 816 p.

_____. **Gerenciamento da Cadeia de Suplementos:** Planejamento, Organização e Logística Empresarial. Porto Alegre: Bookman, 2001.

_____. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BELFIORE, P. P.; FÁVERO, L. P. L. **Problema de roteirização de veículos com janelas de tempo: revisão da literatura**. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 13, 2006, Bauru. Anais...Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006, p. 12.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. Brazilian logistics: a time for transition. **Gestão e Produção**, v. 4, n. 2, p.130-139, 1997.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos.** Porto Alegre: Bookman, 2006.

CAIXETA-FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Carga.** São Paulo: Atlas, 2001.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia Científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2007.

CUNHA, C. B. **Uma Contribuição para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais**. 222 f. Tese (Doutorado) – Escola de Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1997.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**, v.8, n. 2, p.51-74, 2000.

CUNHA, C. B. Um Modelo Matemático para o Problema de Sequenciamento e Programação de Visitas de Gerentes de Banco. **Gestão & Produção**, v.10, n.2, p.183-196, 2003.

DÁVALOS, R. V. **Tecnologia da informação e os processos de roteirização com restrições de janela de tempo.** In: Simpósio de Engenharia de Produção, 13, 2006, Bauru. Anais...Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006, p. 12.

ENOMOTO, L. M. **Análise da Distribuição Física e Roteirização em um Atacadista do Sul de Minas Gerais.** 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

ESTEVAM, J. B. **Heurísticas para o Problema de Roteamento de Veículos Capacitados (PRVC) Visando Aplicação no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos.** 117 f. Monografia (Bacharel em Ciência da Computação), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

FAN, J**. Dynamic Vehicle Scheduling Problem with Changeable Time Window.** In: International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 6, Tianjin, 2009. Annals…Tianjin: Tianjin University of Technology, 2009, p. 5.

FERREIRA, K. A.; RIBEIRO, P. C. C. **Tecnologia da Informação e Logística:** Os impactos do EDI nas operações logísticas de uma empresa do setor automobilístico. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 23, Ouro Preto, 2003. Anais...Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2003, p.8.

FLEURY, P. F. Logística Integrada. In: FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. (Org.). **Logística Empresarial:** A perspectiva brasileira. Coleção COPPEAD de Administração. Atlas: São Paulo, 2000. Cap. 2, p. 27-37.

GAMA, M. B. **Roteirização de Veículos: Implementação e Melhoria do Método de Clarke e Wright.** 93 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2011.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KOCHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 28. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2009.

LAPORTE, G. The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v.59, n.3, p.345-358. 1992.

LAU, H. C.; SIM, M.; TEO, K. M. Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles. **European Journal of Operational Research**, v. 148, p.559-569, 2003.

MANFROI, A. S. **A Logística de Transporte e as Cadeias Agropecuárias Avícola e Suinícola, Impacto Social e Econômico no Desenvolvimento Local do Município de Toledo – PR.** 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MORGAN, M.J.W.; MUMFORD, C.L. **Capacitated vehicle routing: perturbing the landscape to fool an algorithm.** In: Congress on Evolutionary Computation, Edinburgh, 2005. Annals...Edinburgh: University of Edinburgh, 2005, p. 7.

MOURA, R. A. **Os Desafios Logísticos**. Artigos e Casos. Disponível em: < http://www.guialog.com.br/ARTIGO142.htm>. Acesso em 2 out. 2011.

NARUO, M. K. **O estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando sistema de informações geográficas**. 286 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição:** estratégia, operação, e avaliação. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

OLIVEIRA, A. C. M. **Algoritmos Evolutivos Híbridos com Detecção de Regiões Promissoras em Espaços de Busca Contínuos e Discretos.** 202 f. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

PAULA, M. A. A. F. **Estudo de Roteirização de Veículos Empregando o TRANSCAD:** contribuição para a distribuição urbana de cargas. 104 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PUREZA, V.; LAZARIN, D. F. Um estudo de impactos do roteamento dinâmico de veículos em atividades de prestação de serviço. **Revista Produção**, v. 20, n. 4, p. 589-600, out./dez. 2010.

QING, Y.; FUYING, C.; JINLIN, W. **A heuristic algorithm for a vehicle dispatching problem with changeable time window.** Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, p. 1834-1838, Beijing, 2010.

RIBAS, S. **Um algoritmo híbrido para o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo.** 59 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

RIBEIRO, G. M.; RUIZ, M. D. V.; DEXHEIMER, L. **Programa de Roteamento de Veículos Aplicação no Sistema de Coleta dos Correios.** In: Encontro Nacional de

Engenharia de Produção, 19, Rio de Janeiro, 1999. Anais...Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999, p.8.

RIBEIRO, G. M.; RUIZ, M. D. V.; DEXHEIMER, L. **Programa de Roteamento de Veículos Aplicação no Sistema de Coleta dos Correios.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 21, Salvador, 2001. Anais...Salvador: FTC, 2001, p.8.

SILVA, G. L. **Uma nova Abordagem para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais**. 92 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2010.

SILVA-JÚNIOR, O. S.; HAMACHER, S. **Comparação de Modelos Exatos para Solução do Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo.** XLII SBPO, Bento Gonçalves, p.1-8, 2010.

SOLOMON, M.M.; DESROSIERS, J. Time Window Constrained Routing and Scheduling Problem. **Transportation Science**, v.22, n.1, p.1-13, 1988.

TENKLEY, N. L. **Order Picking:** Modelos e Algoritmos de Roteamento. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WU, L. **O problema de roteirização periódica de veículos**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.